

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ  
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ ТА СИСТЕМ

«На правах рукопису»  
УДК 621.382.2/.3

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис) Юлія ЯМНЕНКО  
(ініціали, ПРІЗВИЩЕ)  
“ ” 2020р.

**Магістерська дисертація**  
**на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальністю 171 Електроніка  
(код і назва)

освітня програма (спеціалізація) Електронні компоненти і системи

на тему: Інтегральні сенсори струму на ефекті Холла з магнітною компенсацією  
напруження

Виконав (-ла): студент (-ка) II курсу, групи ДС-91мп  
(шифр групи)

Корчака Микола Олександрович  
(прізвище, ім'я, по батькові) \_\_\_\_\_ (підпис)

Науковий керівник: доц., доц., к.т.н., Олександр БОНДАРЕНКО  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, ім'я ПРІЗВИЩЕ) \_\_\_\_\_ (підпис)

Консультант \_\_\_\_\_  
(назва розділу) \_\_\_\_\_ (науковий ступінь, вчене звання, ім'я ПРІЗВИЩЕ) \_\_\_\_\_ (підпис)

Рецензент: в.о. дир. НДІ ЕМСТ, доц., к.т.н., Дмитро ТАТАРЧУК  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, ім'я ПРІЗВИЩЕ) \_\_\_\_\_ (підпис)

Консультант  
по нормоконтролю: доц., к.т.н. Лариса БАТРАК  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, ім'я ПРІЗВИЩЕ) \_\_\_\_\_ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського”**

Факультет Електроніки

( повна назва )

Кафедра Електронних пристроїв та систем

( повна назва )

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо - професійною програмою

Спеціальність 171 Електроніка

(шифр і назва)

Освітня програма (спеціалізація) Електронні компоненти та системи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Юлія ЯМНЕНКО  
( ім'я ПРІЗВИЩЕ )

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 року

**З А В Д А Н Н Я**

**НА МАГІСТЕРСЬКУ ДИСЕРТАЦІЮ СТУДЕНТУ**

Корчаці Миколі Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Інтегральні сенсори струму на ефекті Холла з магнітною компенсацією напруження

науковий керівник дисертації: Олександр БОНДАРЕНКО, доц., к.т.н.,  
(ім'я ПРІЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «05» листопада 2020 року № 3241-с

2. Термін подання студентом дисертації: 08 листопада 2020 року

3. Об'єкт дослідження: напівпровідникові інтегральні сенсори струму на ефекті Холла.

4. Вихідні дані: існуючі інтегральні сенсори струму на ефекті Холла.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: дослідити принципи роботи сенсорів струму на ефекті Холла; дослідити причини виникнення напруження в інтегральних сенсорах струму на ефекті Холла; розробити власний сенсор струму на ефекті Холла з схемою компенсації дії напруження.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: ілюстрації дії напруження на інтегральні сенсори, схеми компонентів розробленого сенсора струму на ефекті Холла, результати симуляцій.

7. Орієнтовний перелік публікацій: 1. Корчака М. О. Розробка нового підходу проектування інтегральних сенсорів струму / М. О. Корчака // Електронна та Акустична Інженерія. – 2020. – Том 3, №2. – С. 16–19.

2. М. О. Корчака, О. Ф. Бондаренко. Дослідження напруження в інтегральних сенсорах на ефекті Холла. – подано до фахового видання категорії «Б»: «Технологія і конструювання в електронній апаратурі».

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання: 28.10.2020

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз існуючих сенсорів струму	28.10.20-31.10.20	Виконав
2	Аналіз інтегральних сенсорів струму на ефекті Холла	01.11.20-04.11.20	Виконав
3	Аналіз дії напруження на інтегральні сенсори струму на ефекті Холла	05.11.20-09.11.20	Виконав
4	Аналіз методів компенсації дії напруження	10.11.20-14.11.20	Виконав
5	Підготовка статті до публікації	01.10.20-15.11.20	Виконав
6	Розробка інтегрального сенсора струму на ефекті Холла	16.11.20-19.11.20	Виконав
7	Розробка схеми компенсації дії напруження	20.10.20-26.11.20	Виконав
8	Проведення симуляцій	27.11.20-1.12.20	Виконав

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Микола КОРЧАКА

(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_ (підпис)

Олександр БОНДАРЕНКО

(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

## АНОТАЦІЯ

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 94 сторінки, у тому числі 85 сторінок основного тексту, 65 рисунків, 25 таблиць, список використаних джерел із 56 найменувань.

Метою дисертаційної роботи є розробка напівпровідникового інтегрального сенсора струму на ефекті Холла зі схемою компенсації дії напруження, яка використовує інтегровано котушку індуктивності.

При розв'язанні поставлених у роботі завдань для розробки і проєктування інтегрального сенсора струму на ефекті Холла використано теорію електричних кіл, теорію авторегулювання та керування. Математичні розрахунки виконано у програмному середовищі MATLAB. Симуляції електричних кіл проведено у програмному середовищі Cadence Virtuoso. Під час симуляцій використано методи Монте-Карло для статистичного врахування випадкових процесів під час виготовлення напівпровідникових інтегральних мікросхем.

В результаті роботи було спроектовано інтегральний сенсор струму на ефекті Холла з схемою компенсацією дії напруження, яка дозволяє забезпечити незмінність чутливості елемента Холла в межах не більше 1% впродовж тривалої експлуатації пристрою. Новизна роботи полягає в тому, що схема компенсації реалізовано повністю в аналоговій частині і не потребує додаткових обрахунків в цифровій частині сенсора.

Результати роботи можуть бути використані не лише для сенсорів струму на ефекті Холла, але і для інших інтегральних схем, які використовують елементи Холла, наприклад для відстеження об'єктів у просторі, вимірювання швидкості та напрямку обертання двигуна, для безконтактного перемикання.

Для подальших дослідження необхідно виготовити прототип спроектованого сенсора на кремнії і продовжити аналіз його характеристик.

**Ключові слова:** сенсор струму, ефект Холла, напруження, компенсація, інтегрована котушка, п'єзоефект.

## ANNOTATION

The thesis consists of an introduction, five sections, conclusions, a list of sources used. The total volume of the thesis is 94 pages, including 85 pages of the main text, 65 figures, 25 tables, a list of used sources from 56 titles.

The purpose of the thesis is to develop a semiconductor integrated current sensor on the Hall effect with a voltage compensation circuit that uses an integrated inductor.

The theory of electric circuits, the theory of self-regulation and control is used in solving the tasks set in the work for the development and design of an integrated current sensor on the Hall effect. Mathematical calculations were performed in the MATLAB software environment. Simulations of electric circuits were performed in the Cadence Virtuoso software environment. During the simulations, Monte Carlo methods were used to statistically consider random processes in the manufacture of semiconductor integrated circuits.

As a result of work the integrated current sensor on Hall effect with the scheme of stress compensation which allows to provide invariability of sensitivity of a Hall element within no more than 1% during long operation of the device was designed. The novelty of the work is that the compensation scheme is implemented entirely in the analog domain and does not require additional calculations in the digital part of the sensor.

The results can be used not only for Hall effect current sensors, but also for other integrated circuits that use Hall elements, such as tracking objects position, measuring the speed and direction of rotation of the motor, for contactless switching.

For further research it is necessary to make a prototype of the designed sensor on silicon and to continue the analysis of its characteristics.

***Keywords:*** current sensor, Hall effect, stress, compensation, integrated coil, piezoelectric effect.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	6
<b>1. ОГЛЯД СЕНСОРІВ СТРУМУ НА ЕФЕКТИ ХОЛЛА</b> .....	10
1.1 Сенсори струму .....	10
1.2 Ефект Холла .....	16
1.3 Напруга зсуву, компенсація напруги зсуву .....	20
Висновки до першого розділу.....	24
<b>2. ВПЛИВ НАПРУЖЕННЯ НА ЧУТЛИВІСТЬ СЕНСОРІВ СТРУМУ НА ЕФЕКТИ ХОЛЛА</b> .....	26
2.1 Теорія напруження .....	27
2.2 Напруження в кремнієвих інтегральних мікросхемах .....	29
2.2.1 Напруження, яке виникає внаслідок фабрикації .....	29
2.2.2 Напруження, яке виникає внаслідок корпусування .....	31
2.2.3 Напруження, яке виникає під впливом вологості .....	34
2.3 Ефекти в інтегральних мікросхемах, викликані напруженням .....	38
Висновки до другого розділу.....	43
<b>3. ОСОБЛИВОСТІ ПРОЄКТУВАННЯ СЕНСОРІВ СТРУМУ НА ЕФЕКТИ ХОЛЛА</b> .....	44
3.1. Джерело опорної напруги .....	44
3.2. Елемент Холла та драйвер .....	47
3.3. Аналоговий фронт-енд та АЦП .....	54
Висновки до третього розділу .....	57
<b>4. КОМПЕНСАЦІЯ ДІЇ НАПРУЖЕННЯ ДЛЯ СЕНСОРІВ СТРУМУ НА ЕФЕКТИ ХОЛЛА</b> .....	59
4.1. Існуючі методи компенсації напруження. Магнітна компенсація.....	59
4.2. Проєктування та розрахунки схеми магнітної компенсації .....	62
4.3. Аналіз характеристик інтегральних сенсорів струму з компенсацією дії напруження .....	70

Висновки до четвертого розділу.....	73
<b>5. РОЗРОБКА СТАРТАП- ПРОЕКТУ .....</b>	<b>75</b>
5.1. Опис ідеї технології .....	75
5.2. Технологічний аудит ідеї проєкту .....	76
5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту.....	76
5.4. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту .....	80
5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту .....	82
Висновки до п'ятого розділу.....	84
<b>ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....</b>	<b>85</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>89</b>
<b>ДОДАТОК А. ФУНКЦІОНАЛЬНА БЛОК-СХЕМА АНАЛОГОВОЇ</b>	
<b>ЧАСТИНИ СЕНСОРА</b>	
<b>ABSTRACT</b>	



## ВСТУП

**Актуальність теми.** Досягнення в галузі технологій виготовлення сенсорів покращили показники точності і надійності сенсорів, а також знизили їх вартість. На сьогоднішній день доступно багато сенсорів, серед яких важливе місце займають інтегральні сенсори. Задача точного вимірювання струму завжди була актуальною для електроніки. З розвитком мікроелектроніки також почалися процеси дослідження і виготовлення інтегральних сенсорів струму. Серед багатьох сенсорів струму помітне місце займають інтегральні сенсори струму на ефекті Холла. Ці сенсори відносять до класу магнітних сенсорів, оскільки вони міряють струм не шляхом включення їх у гілку протікання струму, а безконтактно – роблячи вимірювання магнітного поля, яке створюється протіканням струму через провідник. Кремнієві магнітні сенсори струму на ефекті Холла знайшли своє застосування в системах управління двигунами, в пристроях керування акумуляторами, в пристроїв для захисту електричних схем.. Сенсори струму на ефекті Холла мають певні ключові переваги в порівнянні з іншими магнітними сенсорами: їх можна легко інтегрувати в кремній разом із схемами для посилення сигналу та системами управління без додаткових етапів обробки, а їх напругу зсуву можна компенсувати за допомогою динамічної компенсації.

Перед тим як почати застосовувати сенсор за призначенням його зазвичай попередньо налаштовуються виробники, а в деяких випадках і користувачем. Однак незважаючи на попередні налаштування, деякі параметри сенсора, такі як чутливість, можуть змінитися в процесі експлуатації. Причинами цих змін можуть бути різні фактори, наприклад робота в різних температурних умовах, вплив рівня вологості, що в свою чергу може призвести до виникнення напруження, яке призводить до п'єзоелектричного ефекту, що може спричинити зміну чутливості сенсора. Зазвичай зміни до яких можуть призвести ці ефекти неможливо передбачити. Однак ці зміни можливо

компенсувати. Тому задача створення інтегрального сенсора струму на ефекті Холла з схемою компенсації дії напруження є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження за темою дисертації проводились на кафедрі електронних пристроїв та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за підтримки Міністерства освіти і науки України (ДБ № 0119U100189 та № 0120U101285), відповідно до положень Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» та «Переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020», який затверджено постановою Кабінету Міністрів України від 7 вересня 2011 р. № 942. Також здобувачем підготовлено заявку на отримання гранту від IEEE за програмою IEEE Grant for Student Application Papers Applying Industry Standards.

**Мета і завдання досліджень.** Метою дисертаційної роботи є дослідження і розробка напівпровідникового інтегрального сенсора струму на ефекті Холла зі схемою компенсації дії напруження, яка забезпечить незмінність чутливості та інших параметрів сенсора впродовж довготривалої експлуатації. Для досягнення мети в роботі вирішуються такі задачі:

1. Аналіз принципу роботи інтегральних сенсорів струму на ефекті Холла.
2. Аналіз процесів напруження, які виникають під час фабрикації, корпусування та експлуатації інтегральних сенсорів на ефекті Холла.
3. Оптимізація топології сенсора струму на ефекті Холла.
4. Аналіз та порівняння характеристик сенсорів струму на ефекті Холла з магнітною компенсацією дії напруження.
5. Розробка стартап-проєкту.

*Об'єктом дослідження* є процес компенсації дії напруження в інтегральні сенсори струму на ефекті Холла.

*Предметом дослідження є характеристики сенсорів струму на ефекті Холла з магнітною компенсацією дії напруження впродовж тривалої експлуатації.*

**Методи дослідження:** При розв’язанні поставлених у роботі завдань для розробки і проєктування інтегрального сенсора струму на ефекті Холла використано теорію електричних кіл; для розробки і аналізу схеми компенсації використано теорію авторегулювання та керування. Математичні розрахунки виконано у програмному середовищі MATLAB. Симуляції електричних кіл проведено у програмному середовищі Cadence Virtuoso. Під час симуляцій використано методи Монте-Карло для статистичного врахування випадкових процесів під час виготовлення напівпровідникових інтегральних мікросхем.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

— Уперше запропоновано топологію системи компенсації дії напруження для інтегральних сенсорах струму на ефекті Холла, яка відрізняється від існуючих наявністю прецизійного фільтра в ланці зворотного зв’язку та високостабільних опорних джерел живлення, що дозволило значно спростити топологію інших частин сенсора, зменшило площу системи на кристалі, а також забезпечує незмінність чутливості сенсора в межах 1% впродовж довготривалої експлуатації.

— Удосконалено топологію систему керування драйвером струму елемента Холла за рахунок використання додаткових регулюючих джерел струму, які можуть бути використані для калібрування чутливості сенсора після етапу виготовлення ІС, що забезпечує можливість налаштувати значення чутливості на потрібне значення.

**Практичне значення одержаних результатів:**

— Уперше для запропонованої топології проведено статистичний аналіз в широкому температурному діапазоні та при різних можливих напругах живлення за допомогою методів Monte-Carlo (враховуючи таким чином

можливий розкид параметрів сенсора при виробництві), результати якого підтверджують незмінність чутливості в межах 1%.

— Запропонована схема компенсації дії напруження може бути використана не лише для сенсорів струму на ефекті Холла, але і для інших інтегральних схем, які використовують елементи Холла, наприклад для відстеження об'єктів у просторі, вимірювання швидкості та напрямку обертання двигуна, для безконтактного перемикавання.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертаційна робота є узагальненням результатів теоретичних і експериментальних досліджень, проведених автором самостійно. Робота [1] написана автором дисертації особисто. У роботі, опублікованій із співавторами, дисертанту належать: [2] – дослідження можливих причин виникнення напруження мікросхемах, аналіз способів компенсації дії напруження.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи обговорювалися на міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених «Електроніка-2020».

#### **Публікації:**

1. Корчака М. О. Розробка нового підходу проектування інтегральних сенсорів струму / М. О. Корчака // Електронна та Акустична Інженерія. – 2020. – Том 3, №2. – С. 16–19 .

2. М. О. Корчака, О. Ф. Бондаренко. Дослідження напруження в інтегральних сенсорах на ефекті Холла. – подано до фахового видання категорії «Б»: «Технологія і конструювання в електронній апаратурі».

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 94 сторінки, у тому числі 85 сторінок основного тексту, 65 рисунків, 25 таблиць, список використаних джерел із 56 найменувань.

# 1 ОГЛЯД СЕНСОРІВ СТРУМУ НА ЕФЕКТІ ХОЛЛА

## 1.1. Сенсори струму

Сенсори струму використовується для виконання двох основних функцій в електричних колах. По-перше, вони використовуються для вимірювання значення струму, що протікає в ланцюзі. Це виміряне значення може бути використано для прийняття рішення про вимкнення периферійних навантажень для економії енергії або для повернення до нормального режиму роботи. Друга функція - визначити, коли струму занадто багато або виявити стан несправності. Якщо струм перевищує безпечні межі, виконується умова програмного чи апаратного блокування після чого подається сигнал на вимкнення програми. Можливими причинами можуть бути зупинка двигуна або коротке замикання. Важливо вибрати відповідну технологію з необхідною міцністю, щоб належним чином протистояти екстремальним умовам, які можуть існувати під час несправності [1, с.7].

Для вимірювання струму існує ціла низка можливих способів:

- 1) Резистивні (пряме вимірювання)
  - за допомогою шунта;
  - за допомогою опора дроселя.
- 2) Магнітні (непряме вимірювання)
  - трансформатори струму;
  - котушки Роговського;
  - сенсори на ефекті Холла.

Використання шунта – це метод прямого вимірювання струму, який має перевагу простоти та лінійності. Шунт розміщується на одній лінії зі струмом, що вимірюється, і результуючий потік струму призводить до перетворення невеликої кількості потужності в тепло. Внаслідок цього виникає напруга, яку можна виміряти. Окрім сприятливих характеристик простоти та лінійності,

шунт є економічно вигідним рішенням зі стабільним температурним коефіцієнтом опору  $0,01\%/^{\circ}\text{C}$ . Також існують напівпровідникові рішення, які використовують шунт для вимірювання струму за таким же принципом. Зазвичай шунт підключають до плюса живлення, або до мінуса живлення. На рис. 1.1. зображено приклади вимірювання струму в 3-фазному двигуні за допомогою шунта.

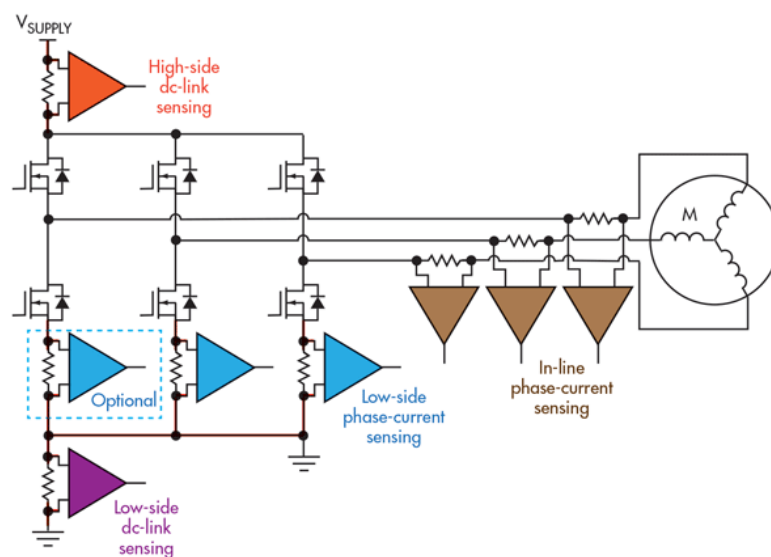


Рис. 1.1. Приклади вимірювання струму в 3-фазному двигуні

Вимірювання струму від плюса живлення має дві основні переваги над вимірюванням від мінуса живлення: 1) даний спосіб може виміряти високі струми через навантаження, викликані раптовими короткими замиканнями в схемі; 2) включення в такий спосіб не впливає на опір шини землі. Однак для вимірювання струму від плюса живлення датчик має бути в змозі працювати з напругами, синфазний сигнал яких визначається напругою живлення і може становити кілька десятків вольт [2, с.74]. На сьогодні серед виробників інтегральних мікросхем є поширеним виготовлення вбудованих датчиків струму, які міряють напругу на шунті, з використанням «струмового» підходу [3, с.1252]. Для того щоб така схема могла фіксувати струм, що протікає у двох напрямках, від джерела до навантаження і навпаки від

навантаження до джерела, необхідно створювати вбудований зсув в операційний підсилювач [4, с.650]. Однак під час масового виробництва, значення цього зсув від мікросхеми до мікросхеми буде сильно варіювати. Це пов'язано із похибками у технологіях виробництва. Також дана схема є дуже чутливою до варіацій в напрузі живлення і до варіацій в напрузі синфазного сигналу, що може спричинити велику похибку вимірювання на виході. В таких схемах напругою живлення операційного підсилювача є напруга живлення схеми [5, с.44]. У зв'язку з цим операційний підсилювач має бути побудований на високовольтних транзисторах, які займають багато місця на кристалі, а також дуже чутливі до технологічного процесу. Такі проблеми можуть бути вирішені шляхом розробки нових схем та способів, як наприклад у джерелі [6, с.18]. На рис. 1.2. зображено функціональну блок-схему вимірювання струму через шунт, використовуючи віртуальну землю.

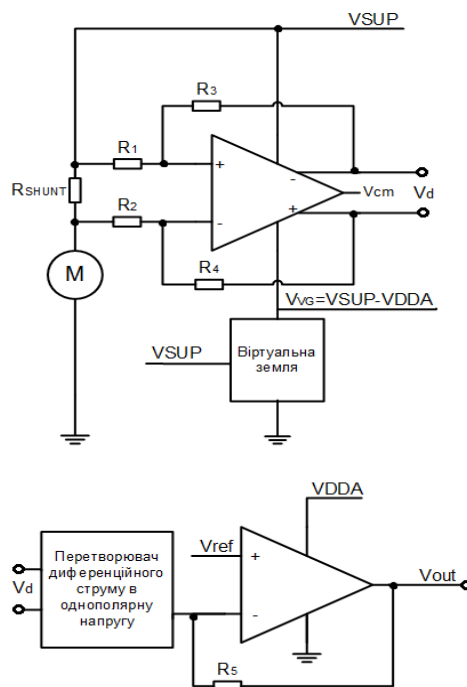


Рис. 1.2. Функціональна блок-схема вимірювання струму через шунт, використовуючи віртуальну землю

Опір постійного струму індуктивності також може бути використаний для забезпечення резистивного вимірювання струму. Цей метод вважається без

втратами через низьке значення опору міді, як правило,  $<1$  мОм, і оскільки він забезпечує вторинне використання існуючого компонента. Цей метод має два недоліки. По-перше мідь має високий ТКО приблизно 3900ppm, що змушує значення опору збільшуватися на 39% при підвищенні на  $100^\circ\text{C}$  вище кімнатної температури. Через цей високий ТКО температуру потрібно контролювати та компенсувати, щоб забезпечити прийнятне вимірювання струму. Другим недоліком є варіювання опору міді внаслідок технологічних процесів [1, с.10].

Трансформатор струму має три ключові переваги використання: він забезпечує ізоляцію від лінії сигналу, забезпечує вимірювання струму без втрат, а напруга сигналу може бути великою, забезпечуючи показник стійкості до шуму. Цей метод непрямого вимірювання має місце при вимірюванні струму, який змінюється у часі, наприклад, змінний струм, струм перехідних процесів або комутований постійний струм. Ця умова необхідна для забезпечення змінного магнітного поля, яке магнітно пов'язане із вторинними обмотками.

На рис. 1.3. зображено принцип вимірювання струму за допомогою трансформатора струму.

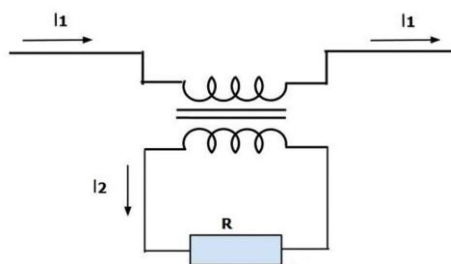


Рис. 1.3. Вимірювання струму за допомогою трансформатора струму

Виміряне значення можна масштабувати відповідно до співвідношення витків між первинною та вторинною обмотками. Цей метод вимірювання вважається без втрат, оскільки струм ланцюга проходить через мідні обмотки з дуже малими резистивними втратами. Однак невелика кількість потужності



втрачається через втрати трансформатора від резистора навантаження, втрати сердечника та первинний та вторинний опір постійного струму [1, с.12].

Котушка Роговського схожа на трансформатор струму, оскільки напруга, пропорційній потоку струму через ізольований провідник, індукується у вторинній котушці. Відмінністю є те, що котушка Роговського являє собою трансформатор струму з повітряним сердечником, в той час як для трансформатора струму використовується сердечник з високою проникністю (наприклад багат шарова сталь) для магнітного з'єднання з вторинною обмоткою. Конструкція повітряного сердечника має нижчу індуктивність, забезпечуючи більш швидку реакцію сигналу і дуже лінійну напругу сигналу. Завдяки своїй конструкції він часто використовується як метод вимірювання струму на існуючій електропроводці, наприклад як лічильник електроенергії. Котушку Роговського можна вважати дешевою альтернативою трансформатору струму [1, с.10]. На рис. 1.4. показано вимірювання струму за допомогою котушки Роговського.

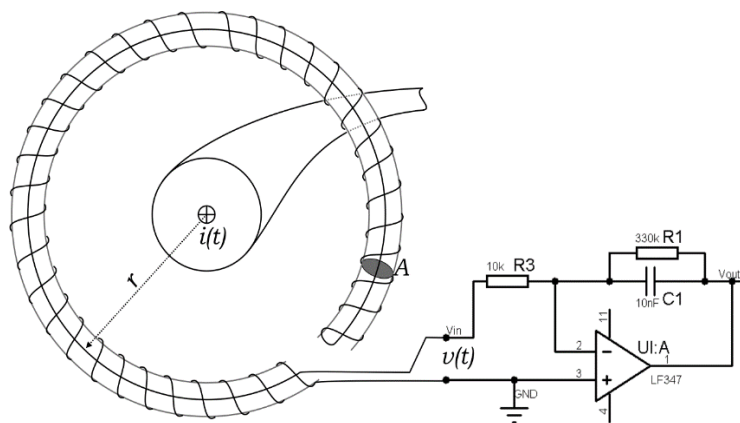


Рис. 1.4. Вимірювання струму за допомогою котушки Роговського

Іншим способом вимірювати струм непрямо є використання сенсорів на ефекті Холла. Це інтегральні сенсори, які мають ряд переваг: вони дешеві; займають мало місця; підсилювач та АЦП для цифрової обробки можуть бути виконані як одна мікросхема; можуть програмно налаштовуватися; швидкодія. Із недоліків: вони є температурно залежними і потребують внутрішніх

компенсацій, а також мають обмежений робочий частотний діапазон. На рис. 1.5. зображено вимірювання струму за допомогою сенсора Холла.

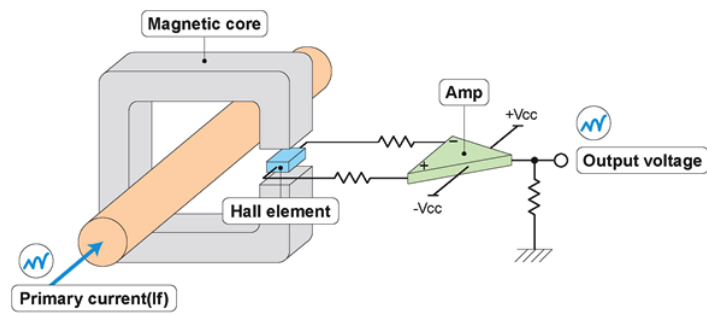


Рис. 1.5. Вимірювання струму за допомогою сенсора Холла

Вимірювання струму може здійснюватися за допомогою магнітного осердя, або без нього, для цього розробляють спеціальний клас мікročипів. На рис. 1.6. наведено вимірювання струму без осердя за допомогою сенсора Холла.

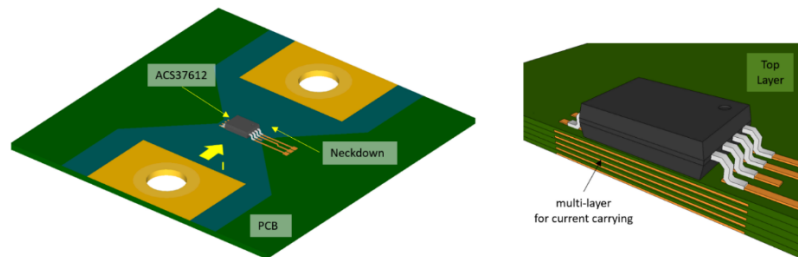


Рис. 1.6. Вимірювання струму без осердя за допомогою сенсора Холла

На рис. 1.7. представлено функціональну схему сенсора струму на ефекті Холла.

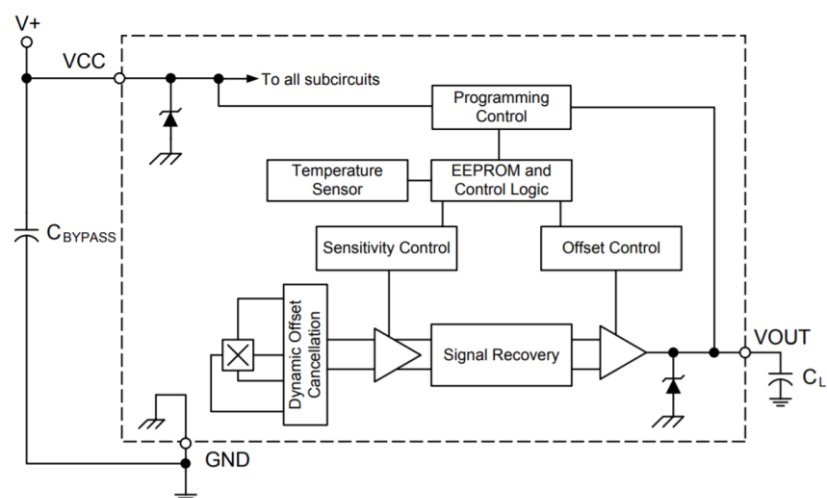


Рис. 1.7. Функціональна схема сенсора струму на ефекті Холла

## 1.2. Ефект Холла

Явище ефект Холла було названо в честь фізика Едвіна Холла, який його відкрив. У 1879 р. він виявив, що якщо провідник або напівпровідник, через який протікає струм в одному напрямку, розмістити перпендикулярно магнітному полю, то виникне поперечна різниця потенціалів під прямим кутом до напрямку протікання струму, яку можна виміряти [7, с.287].

Це явище можна пояснити наступним чином. Якщо помістити носій заряду у електромагнітне поле, то на носій заряду почне діяти сила, одна складова якої паралельна до напрямку електричного поля, а інша складова нормальна до напрямку магнітного поля та напрямку руху частинки. Це - сила Лоренца:

$$\vec{F} = q(\vec{E}_E + \vec{v} \times \vec{B}), \quad (1.1)$$

де  $\vec{E}_E$  – зовнішнє магнітне поле, внаслідок дії якого носій заряду рухається,  $q$  – заряд,  $v$  – швидкість руху носія заряду та  $\vec{B}$  – магнітне поле. Для дірок  $q_h = q = 1.602 \times 10^{-19}$  Кл.

Опишемо ефекту Холла більш детально. Будемо вважати, що швидкість носіїв заряду є однаковою для всіх носіїв, а також знехтуємо термальним рухом частинок (рух під впливом температури) [8, с.35]. Розглянемо два напівпровідникові бруска довжиною  $l$ , шириною  $w$  та товщиною  $t$ , для яких справедлива рівність  $l \gg w, t$ . Нехай один із брусків - провідник n-типу, а другий - p-типу. Будемо вважати, що матеріали брусків сильно леговані ( $n, p \gg n_i$ ). При наявності зовнішнього електричного поля  $E$  уздовж всієї довжини  $L$ , швидкість дрейфу носіїв заряду та їх щільності будуть визначатися як:

$$\vec{v}_e = -\mu_e \vec{E}_E, \quad (1.2)$$

$$\vec{J}_e = -nq_e \mu_e \vec{E}_E = nq \mu_e \vec{E}_E, \quad (1.3)$$

$$\vec{v}_h = \mu_h \vec{E}_E, \quad (1.4)$$

$$\vec{J}_h = pq_h \mu_h \vec{E}_E = pq \mu_h \vec{E}_E, \quad (1.5)$$

де  $n$  – концентрація електронів,  $\mu_e$  – рухливість електронів,  $p$  – концентрація дірок,  $\mu_h$  – рухомість дірок.

На рис. 1.8. показано ефект Холла в напівпровідниках n-типу та p-типу.

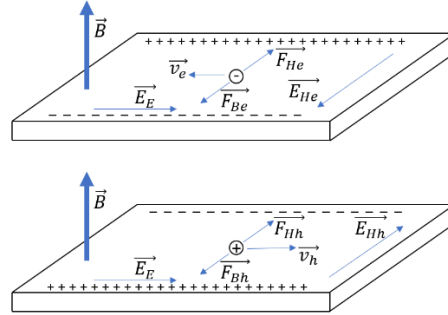


Рис. 1.8. Ефект Холла в напівпровіднику n-типу (зверху) та p-типу (знизу)

Якщо цієї ж миті магнітне поле  $B$  буде прикладено нормально до площі, яка визначена довжиною  $L$  і шириною  $W$ , то сила з якою це магнітне поле  $B$  буде діяти на носії заряду буде дорівнювати:

$$\vec{F}_{Be} = -q_e \mu_e [\vec{E}_E \times \vec{B}] = q \mu_e [\vec{E}_E \times \vec{B}], \quad (1.6)$$

$$\vec{F}_{Bh} = q_h \mu_h [\vec{E}_E \times \vec{B}] = q \mu_e [\vec{E}_E \times \vec{B}]. \quad (1.7)$$

Сила, що діє на заряджені частинки, призведе до накопичення частинок на одному з країв бруска, що в свою чергу зумовить зростання концентрації носіїв заряду на одному краї бруска та зменшення концентрації носіїв заряду на протилежному краї. У зв'язку з цим виникне електричне поле  $E_H$  (електричне поле Холла), яке збалансує вплив магнітного поля, за умови незмінності всіх інших факторів.

$$\vec{F}_B + \vec{F}_H = 0, \quad (1.8)$$

$$\vec{F}_{Be} = -\vec{F}_{He} = -q_e \vec{E}_{He} = q \vec{E}_{He}, \quad (1.9)$$

$$\vec{F}_{Bh} = -\vec{F}_{Hh} = -q_h \vec{E}_{Hh} = q \vec{E}_{Hh}, \quad (1.10)$$

$$\vec{E}_{He} = \mu_e [\vec{E}_E \times \vec{B}] = -\frac{1}{nq_e} [\vec{J}_e \times \vec{B}] = -R_{He} [\vec{J}_e \times \vec{B}], \quad (1.11)$$

$$\vec{E}_{Hh} = -\mu_h [\vec{E}_E \times \vec{B}] = -\frac{1}{pq_e} [\vec{J}_h \times \vec{B}] = -R_{Hh} [\vec{J}_h \times \vec{B}], \quad (1.12)$$

де  $R_H$  – коефіцієнт Холла, який для напівпровідникових матеріалів визначається за наступними формулами:

$$R_{He} = \frac{1}{nq_e} = -\frac{1}{nq}, \quad (1.13)$$

$$R_{Hh} = \frac{1}{pq_h} = \frac{1}{pq}. \quad (1.14)$$

Якщо брати до уваги взаємодію носіїв заряду із кристалічною ґраткою, то коефіцієнт Холла матиме наступний вигляд:

$$R_{He} = \frac{r_H}{nq_e} = -\frac{r_H}{nq}, \quad (1.15)$$

$$R_{Hh} = \frac{r_H}{pq_h} = \frac{r_H}{pq}, \quad (1.16)$$

де  $r_H$  – Холл-фактор, який визначається як:

$$r_H = r_{H0} \alpha, \quad (1.17)$$

де  $r_{H0}$  – коефіцієнт розсіювання Холла, який враховує залежність часу релаксації електронів від швидкості їх руху;  $\alpha$  – коефіцієнт, що враховує ефект анізотропії та ефекти змішування [9, с.4662].

На рис. 1.9. наведено залежність Холл фактора від рівня домішок.

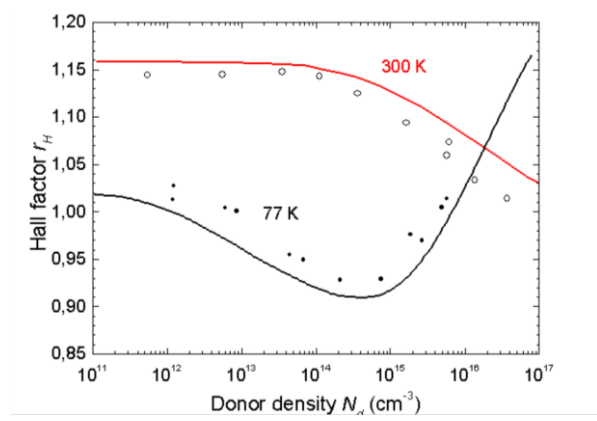


Рис. 1.9. Залежність Холл фактора від рівня домішок

Коефіцієнт розсіювання Холла визначається як:

$$r_{H0} = \frac{\tau^2}{\tau^2}, \quad (1.18)$$

де  $\tau$  – середнє значення часу релаксації для електронів і дірок,  $\tau$  – середнє значення квадрату часу релаксації. При розсіюванні на акустичних коливаннях решітки  $r_{H0} = 1.18$ . При розсіюванні на іонах домішки:  $r_{H0} = 1.93$ .

Напругу Холла  $V_H$  можна отримати інтегруючи вирази (1.11) та (1.12) по електричному полю Холла між двома точками на протилежних краях бруска. Ці дві точки вибираються таким чином, щоб вони мали однаковий електричний потенціал при відсутності магнітного поля:

$$V_{He} = R_{He} J_e B w = \frac{IB R_{He}}{t} = \frac{r_H IB}{n q_e t}, \quad (1.19)$$

$$V_{Hh} = R_{Hh} J_h B w = \frac{IB R_{Hh}}{t} = \frac{r_H IB}{n q_h t}. \quad (1.20)$$

Для простоти, всі виведення далі будуть проведені для напівпровідника n-типу. Чутливість сенсора на ефекті Холла визначається як відношення напруги Холла до прикладеного магнітного поля.

$$S|_{ideal} = \frac{V_H}{B} = \frac{IR_H}{t}. \quad (1.21)$$

Опір напівпровідникового бруска визначається наступним чином:

$$R = \frac{l}{n q \mu_e t w}. \quad (1.22)$$

Якщо елемент Холла не є ідеальним, то чутливість елементу Холла може бути виражена як:

$$S = G_s S|_{ideal} = G_s \frac{IR_H}{t}, \quad (1.23)$$

де  $G_s$  – геометричний поправочний коефіцієнт. Якщо  $R_{\square}$  – квадрат опору матеріалу з якого виготовлено елемент Холла, то можна ввести інший



геометричний поправочний коефіцієнт  $G_R$ , такий що буде визначати опір наступним чином:

$$R = G_R R_{\square} . \quad (1.24)$$

Значення поправочних коефіцієнтів  $G_S$  та  $G_R$  можуть бути визначені для сенсорів Холла різної форми [9, с.4664, 10, с.65].

### 1.3. Напруга зсуву, компенсація напруги зсуву

Якщо магнітне поле відсутнє, то напруга між точками вимірювання повинна дорівнювати нулю. Однак зазвичай це не так. Причиною цього можуть бути розбіжності розмірів контактних площадок, температурні явища, поверхневі заряди та вплив зовнішніх факторів [11, с.22]. Величина напруги зсуву є непередбачуваною, вона буде змінюватися від вибірки до вибірки, а також при різних температурах буде різною. Таке явище впливає на точність вимірювання статичного магнітного поля. Однак, напругу зсуву елемента Холла можна сильно зменшити, використовуючи методи просторового та часового усереднення. Для того щоб дослідити ці методи, використаємо резистивний вимірювальний міст, який є спрощеною моделлю елемента Холла [12, с.744].

На рис. 1.10. наведено спрощену резистивну модель елемента Холла.

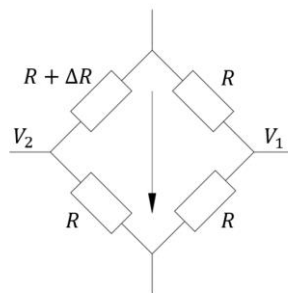


Рис. 1.10. Спрощена резистивна модель елемента Холла

Стрілка вказує напрям протікання струму зміщення,  $V_1$  та  $V_2$  – вихідні сигнали. Один з резисторів не рівний іншим, що відображає наявність зміщення у схемі.

Якщо  $V$  – напруга зсуву, тоді напруга на вимірювальних терміналах буде:

$$V_1 = V \frac{R}{2R}, \quad (1.25)$$

$$V_2 = V \frac{R}{2R + \Delta R}. \quad (1.26)$$

Через невідповідність опорів резисторів виникне зсув  $V_2 - V_1$ , який одразу буде неможливо відрізнити від магнітного сигналу.

Зазвичай для просторового усереднення використовується декілька елементів Холла з'єднаних паралельно, наприклад 2 чи 4. На рис. 1.11. зображено приклад елемента Холла, утвореного з чотирьох окремих елементів.

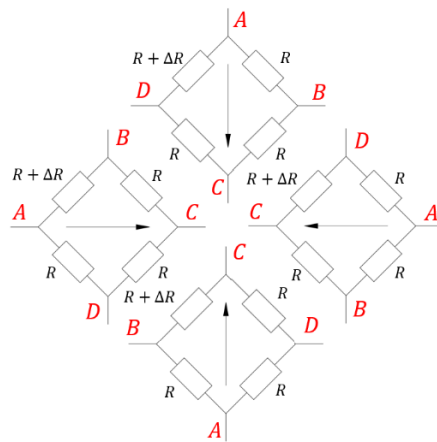


Рис. 1.11. З'єднання елементів Холла для просторового усереднення

На рис. 1.12. представлено еквіваленту схему такого з'єднання.

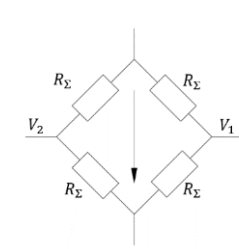


Рис. 1.12. Еквівалентна схема після просторового усереднення

Прості елементи з'єднані між собою таким чином, щоб еквівалентний опір кожної гілки був однаковим.

$$R_{\Sigma} = (R + \Delta R) \parallel R \parallel R \parallel R. \quad (1.27)$$

І тоді:

$$V_1 = V_2 = V \frac{R_{\Sigma}}{2R_{\Sigma}} = \frac{V}{2}. \quad (1.28)$$

В ідеальному випадку це призвело б до повного усунення зміщення. Проте за реальних умов, кожний окремий елемент Холла має своє відмінне значення зміщення, в результаті чого остаточне зміщення після застосування просторового зміщення все ще не дорівнює нулю. Також це призведе до того, що опір такої четвірки буде в чотири рази менше за опір простого елемента Холла. А це в свою чергу збільшить споживання потужності в чотири рази і також зменшить тепловий шум в двічі.

Метод часового усереднення часто називають методом обертання струму або чопінгом. Він полягає у пропускання струму зміщення по колу через різні піни елемента Холла. Разом із струмом зміщення буде обертатися і напруга, в той час як зміщення обертатися не буде. Таким чином обидва сигнали напруги зміщення і напруги, пропорційної магнітному полю, можна розділити одне від одного. Обертання струму може бути дискретним у часі [12, с.744, 13, с.830] або неперервним [14, с.170]. Найпростіша дискретна система обертання струму може бути реалізована, використовуючи дві фази. На рис. 1.13. зображено фази обертання струму.

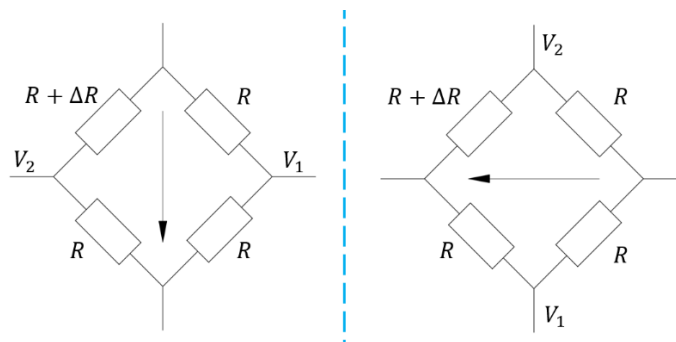


Рис. 1.13. Обертання струму: фаза 1 (зліва) та фаза 2 (справа)

Врахуємо прикладене зовнішнє магнітне, вплив якого буде проявлятися у вигляді напруги  $\pm V_B / 2$  на вихідних вузлах. Під час першої фази:

$$V'_1 = V \frac{R}{2R} + \frac{V_B}{2}, \quad (1.29)$$

$$V'_2 = V \frac{R}{2R + \Delta R} - \frac{V_B}{2}. \quad (1.30)$$

Під час другої фази:

$$V''_1 = V \frac{R}{2R} + \frac{V_B}{2}, \quad (1.31)$$

$$V''_2 = V \frac{R}{2R + \Delta R} - \frac{V_B}{2}. \quad (1.32)$$

Середнє значення двох фаз буде:

$$\bar{V}_1 = \frac{V'_1 + V''_1}{2} = \frac{1}{2} \left( V \frac{R}{2R} + \frac{V_B}{2} + V \frac{R}{2R} + \frac{V_B}{2} \right) = \frac{V}{2} + \frac{V_B}{2}, \quad (1.33)$$

$$\bar{V}_2 = \frac{V'_2 + V''_2}{2} = \frac{1}{2} \left( V \frac{R}{2R + \Delta R} - \frac{V_B}{2} + V \frac{R}{2R + \Delta R} - \frac{V_B}{2} \right) = \frac{V}{2} - \frac{V_B}{2}. \quad (1.34)$$

Таким чином виміряне значення напруги буде рівним:

$$\bar{V}_1 - \bar{V}_2 = V_B. \quad (1.35)$$

Більш точною моделлю елемента Холла буде модель, яка складається з шести резисторів [15, с.1119]. Ця модель допомагає показати, що елемент Холла який керується струмом забезпечує краще скасування зміщення ніж елемент Холла, який керується напругою.

Елементи Холла можуть керуватися або постійним струмом або постійною напругою. Для того щоб отримати показник якості незалежно від умов зміщення, визначимо чутливості для елемента Холла керованого струмом та для елемента Холла керованого напругою. Чутливість визначається за формулою:

$$S = G_s \frac{IR_H}{t}. \quad (1.36)$$

Чутливість елемента керованого струмом тоді буде:

$$S_I = \frac{S}{I} = G_s \frac{R_H}{t} = G_s \frac{r_H}{nqt} . \quad (1.37)$$

Для отримання чутливості, керованої напругою, спочатку виразимо струм зміщення  $I$ , як струм що виникає внаслідок падіння напруги зміщення  $V$ , на опорі елемента Холла  $R$ , який видно між входом і виходом до яких прикладено кероване зміщення.

$$S = G_s \frac{R_H}{t} \frac{V}{R} . \quad (1.38)$$

Чутливість елемента Холла керованого напругою, який має вигляд довгого напівпровідникового бруска, матиме наступний вигляд:

$$S_V = \frac{S}{V} = G_s \frac{R_H}{t} \frac{1}{R} = G_s \frac{r_H}{nqt} \frac{1}{R} = G_s \frac{r_H}{nqt} \frac{nq\mu_e tw}{l} = G_s \mu_e \frac{w}{l} r_H . \quad (1.39)$$

Рівняння (1.39) можна записати у формі:

$$S_V = \frac{G_s}{G_R} \mu_e r_H . \quad (1.40)$$

Точність значення чутливості від зразка до зразка для датчиків Холла, керованих струмом, буде залежати від рівня легування та від точності товщини для даного процесу. Оскільки струми зміщення зазвичай отримують внаслідок падіння постійної напруги на резисторі, то чутливість також буде залежати від точності виробництва цього резистора. Дрейф чутливості датчика Холла, керованого струмом, має невеликий температурний коефіцієнт, що походить від Холл-фактора  $r_H$ .

### Висновки до першого розділу

У розділі було досліджено і порівняно між собою такі сенсори струму як шунт, опір дроселя, трансформатор струму, котушка Роговського та сенсори на ефекті Холла. Було проаналізовано їх переваги і недоліки. Серед всіх цих сенсорів помітну роль займають сенсори на ефекті Холла, які мають наступні переваги порівняно з іншими: вони дешеві; вони компактні; можуть бути побудовані на одному кристалі разом з підсилювачем та блоком цифрової

обробки сигналу; можуть вимірювати струм як з використанням магнітного осердя так і без нього; можуть програмно налаштовуватися. Однак через те що сенсори Холла все ще мають такі недоліки як температурна залежність компонентів вони все ще потребують вдосконалення.

Було досліджено фізичні основи роботи сенсорів на основі ефекту Холла, особливо було приділено увагу проблемі наявності напруги зміщення. Причиною виникнення зміщення можуть бути вплив температури та інших зовнішніх факторів, наявність поверхневих зарядів, а також розбіжність геометричних розмірів елементів внаслідок технологічних процесів. Для компенсації напруги зміщення використовують різні способи динамічної компенсації. Серед таких способів є методи просторового та часового усереднення.

## 2 ВПЛИВ НАПРУЖЕННЯ НА ЧУТЛИВІСТЬ СЕНСОРІВ СТРУМУ НА ЕФЕКТИ ХОЛЛА

Визначальною властивістю кристалічних матеріалів є те, що їх атоми впорядковані в повторюваних структурах. Найменша структура, що повторюється в кристалі, називається елементарною коміркою. Для кубічної кристалічної системи існують деякі типові сингонії - примітивна кубічна, кубічна об'ємоцентрована, кубічна гранецентрована, алмазна та цинкова обманка. Кристалічний кремній має алмазну елементарну комірку, як показано на рис. 2.1., яка складається з двох кубічних гранецентрованих підрешіток, зміщених на одну чверть діагоналі [16, с.48].

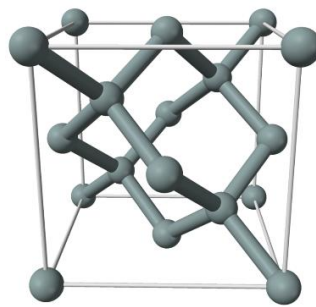


Рис. 2.1. Кристалічна структура кремнію

На рис. 2.2. показано індекси Міллера.

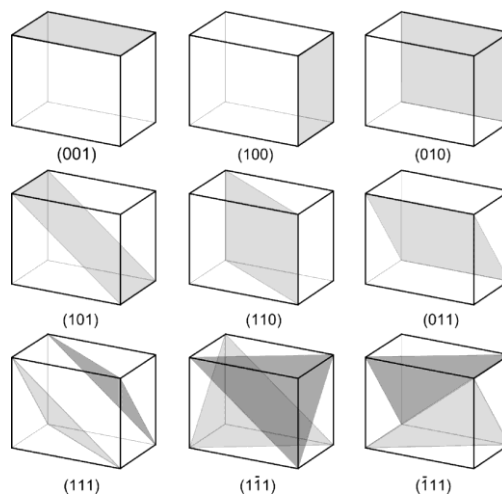


Рис. 2.2. Індекси Міллера



Індекси Міллера описують напрямки решітки та площини ґратки кристала. Через симетрію елементарних комірок кремнію неважко помітити, що, наприклад, напрямки  $100$ ,  $010$  і  $001$  еквівалентні, і їх можна згрупувати в сімейство еквівалентних напрямків  $100$ . Решітчасті площини визначаються напрямками решітки, пов'язаними з ними. Наприклад, напрямок решітки  $100$  є нормальним до площини  $100$ , яка через симетрію кристалів може бути включена в сімейство еквівалентних ґратчастих площин  $100$ .

Загалом кремнієві полікристали вирощують таким чином, що при нарізанні на пластини їх поверхня збігається або з ґратчастою площиною  $100$ , або  $111$ . Для того, щоб ідентифікувати різні типи пластин (кристалографічна орієнтація та тип легування), з пластини видаляються дрібні частини, щоб створити те, що називають поверхнями. На рис. 2.3 зображено пластину типу  $p$   $100$ , тип пластини, яка використовується в цій роботі. Напрямок ґратки  $110$  паралельний (і перпендикулярний) первинній площині, а напрямок ґратки  $100$  має кут  $45^\circ$  відносно первинної площини.

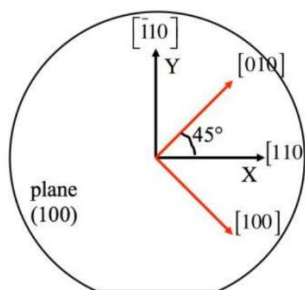


Рис. 2.3. Пластина  $p$ -типу  $100$

## 2.1. Теорія напруження

Поняття напруження ввів французький вчений Огюстен-Луї Коші в 1822 році в ході розгляду теорії пружності [17, с.20]. Напруження  $\sigma$  можна визначити як силу, яка діє на одиницю площі поверхні нескінченно малого об'єму:

$$\sigma = \frac{dF}{dA}, \quad (2.1)$$

де  $dF$  – диференціал сили, що діє на диференціал площі  $dA$  об'єму. Вектор напружень  $\sigma$  складається з нормальних напружень, які діють перпендикулярно поверхні, і дотичних напружень, які діють паралельно площі поверхні. Для поверхні, нормальної до осі  $x$  на елементі диференціального об'єму, нормальне напруження задається  $\sigma_x$ , а дотичні напруження –  $\tau_{xy}$  та  $\tau_{xz}$ . На рис. 2.4. показано представлення всіх компонентів напруження, що діють на нескінченно малий об'єм.

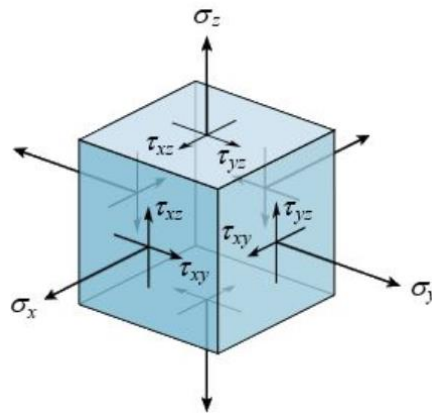


Рис. 2.4. Складові напруження

Тензор напруження матиме вигляд:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

Вважається, що диференціальний об'єм перебуває в стані статичної рівноваги. В цьому випадку матриця напружень симетрична і має шість незалежних компонентів.

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \quad (2.3)$$

)

$$\tau_{yz} = \tau_{zy}, \quad (2.4)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx}, \quad (2.5)$$

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & \sigma_{33} \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

## 2.2. Напруження в кремнієвих інтегральних мікросхемах

### 2.2.1. Напруження, яке виникає внаслідок фабрикації

Під час виготовлення і корпусування інтегральних мікросхем різні матеріали взаємодіють між собою, в результаті чого утворюються складні системи і складні з'єднання. Етапи виготовлення виконуються при різних температурах в діапазоні від кімнатної температури до 1200 °С (для дифузії та окислення). Таким чином термомеханічне напруження може виникати в чипі після охолодження упакованого чипа до температур його застосування (в більшості випадків близько кімнатної температури). Різниця між термічним розширенням кремнію та розширенням інших матеріалів є основною причиною виникнення термомеханічного напруження [18, с.32].

Термомеханічне напруження в інтегральних мікросхемах має два основні джерела походження: напруження, яке виникає під час обробки пластин кремнію та напруження, яке виникає внаслідок корпусування.

Напруження, яке виникає внаслідок обробки пластини кремнію може бути поділено на наступні групи [19, с.60]:

- напруження плівок та напруження, спричинене крайовими ефектами плівок;
- напруження спричинене термічним окисленням;
- напруження пов'язане з вбудованими елементами;
- напруження спричинене термічною обробкою;

- деформацій і дислокації невідповідності в легованих решітках.

Кремнієві інтегральні мікросхеми будується шляхом вбудовування та накладання одне на одного структурних елементів великої кількості різних матеріалів з різними пружними та тепловими властивостями. Такі плівочні слої, як діоксид кремнію, нітрид кремнію, полікристалічний кремній та металічні контакти, багаторазово накладаються на кремнієву підкладку. У цих плівках виникає напруження як внаслідок процесів зростання розмірів плівки (власне напруження) та внаслідок невідповідності коефіцієнтів теплового розширення. Наприклад, при розривах плівки (на краях вікон фотолітографії) виникає велике локалізоване напруження. Механічні властивості тонких плівок недостатньо чітко визначені. Механічні властивості тонких плівок залежать від товщини плівки та її мікроструктури (розмір зерна, орієнтація в просторі, щільність, стехіометрія), що визначається конкретними умовами осадження. В залежності від усіх цих параметрів, тонкі плівки матеріалу часто бувають полікристалічними або аморфними. Мікроструктура плівки змінюється циклами, що часто призводить до дрейфуючих механічних характеристик. Вплив механізмів росту на мікроструктуру та її граничні механічні властивості недостатньо вивчений і є предметом сучасних досліджень.

Також насадження плівки оксиду кремнію на поверхні кремнію призводить до деформації, а отже і до напруження кремнію при кімнатній температурі через невідповідність коефіцієнтів теплового розширення між оксидом кремнію та кремнієм.

Великі локалізовані напруження можуть також виникати навколо вбудованих елементів, таких як металеві лінії, вбудовані в верхні слої.

Напруження, що виникає внаслідок термічної обробки, також часто називають термомеханічним напруженням. Воно виникає внаслідок нерівномірного розподілу температури всередині кремнієвої пластини.

Нерідко причиною виникнення напруження є невідповідності в легованих решітках. Невідповідність решітки може бути спричинена легуючими

речовинами, які за розміром відрізняються від атома кремнію. Це призводить до виникнення локалізованого напруження. Коли накопичена енергія деформації перевищить певний поріг, це призведе до утворення дислокації невідповідності.

Аналогові інтегральні схеми, такі як стабільні джерела опорної напруги та температурні сенсори, часто тримуються після виготовлення. Таким чином, зменшується основна частина похибки на виході, викликаній термомеханічним напруженням. Незважаючи на те, що тримінг не може впливати на другорядні ефекти, пов'язані з механічним дрейфом (який виникає через термоцикли), він може бути ефективним рішенням для зменшення основної частини неточностей, які спричинені напруженням в ході фабрикації. Крім того, це напруження на порядок менше, ніж напруга, яка виникає внаслідок корпусування [20, с.32].

### 2.2.2. Напруження, яке виникає внаслідок корпусування

Після фабрикації та розпилювання кремнієва інтегральна схема готова до корпусування та монтажу. Розрізання пластин і розпаювання виводів не створюють значних механічних навантажень. Кріплення кремнієвої інтегральної схеми та пластикове лиття є основними джерелами напруження під час пакування [20, с.31].

Матеріали, що використовуються для корпусування інтегральних мікросхем, мають різні механічні властивості. Також під час кріплення інтегральної схеми або інкапсуляції пристрою виникає велике термомеханічне напруження [21, с. 17]. В табл. 2.1. наведено механічні властивості деяких матеріалів, що використовуються в електронній упаковці [22, с.21].

Таблиця 2.1.

Механічні показники деяких матеріалів, які використовуються для корпусування

Матеріал	КТР, [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]	Модуль Юнга, [ $10^9 \text{ Па}$ ]
Кремній	2.6	130...190
Кріплення	40...60	1...5
Підкладка корпусу	4...17	12...15

Пластик	13...20	10...15
---------	---------	---------

Кремнієва інтегральна схема зазвичай прикріплюються до підкладки корпусу. Такий монтаж інтегральної схеми забезпечує механічне, теплове, а іноді і електричне з'єднання між напівпровідниковим кристалом і підкладкою. В залежності призначення мікросхеми, для кріплення можуть використовуватися різні матеріали та способи кріплення [23, с.171]. Для вискоефективних та високонадійних мікросхем найчастіше використовують припой та евтектичне сполучення золото-кремній. Іноді використовують процес м'якого скріплення припоєм, який зазвичай досягається шляхом розміщення заготовки припою між задньою частиною стружки і підкладкою з подальшим процесом переплавлення. Порівняно з м'яким припоєм, процес евтектичного з'єднання золото-кремній набагато швидший: його можна виконати за одну секунду. Утворений таким чином зв'язок має відмінні механічні, теплові та електричні властивості. Проте, зв'язок золото-кремній має свої недоліки. Через високу евтектичну точку ( $363^{\circ}\text{C}$ ) зазвичай потрібна температура зв'язку близько  $450^{\circ}\text{C}$ . Внаслідок невідповідності коефіцієнтів теплового розширення (КТУ) виникають великі залишкові напруження в скріпленому чипі. Як результат, кріплення золото-кремній може застосовуватися лише для малих з'єднань кристалу та у ситуаціях, коли невідповідність КТР між чипом та підкладкою корпусу невелика [23, с.171]. Зазвичай, незалежно від того, який було обрано процес кріплення, склеювання здійснюється при температурі вищій за кімнатну. Завдяки різним коефіцієнтам теплового розширення матеріалу підкладки корпусу та кремнію, процеси кріплення кремнію призводять до виникнення температурного напруження під час охолодження скріплених елементів до кімнатної температури.

Зазвичай КТР підкладки та кріплення більші ніж КТР кремнію, що створює напруження на поверхні кремнію. Кремнієва інтегральна схема вигинається і виникає згинальний момент. Цей згинальний момент змушує матеріал у нижній частині кремнію стискатися, а матеріал у верхній частині розтягуватися [24, с.75].

На рис. 2.5. зображено як термомеханічне напруження виникає в кремнієвій пластині, під час процесу кріплення кремнію до підкладки корпусу за умови, що КТР підкладки корпусу більше ніж КТР кремнію.

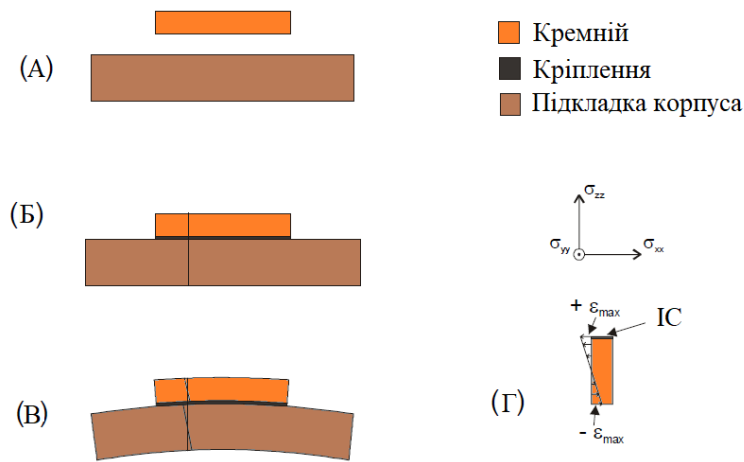


Рис. 2.5. Виникнення напруження на поверхні кремнію внаслідок кріплення до підкладки корпусу

Напруження також виникає під час пакування в пластмасовий корпус. Типовий чип в пластиковому корпусі складається з інтегральної схеми на кристалі кремнію, металевої опори або свинцевої рами, проводів, що електрично кріплять мікросхему до свинцевої рами, та пластикового матеріалу корпусу для захисту мікросхеми та дротових з'єднань. Процес лиття є найпопулярнішим способом корпусування інтегральних схем. Незважаючи на те, що лиття під тиском – технологія, яка використовується вже давно, її все ще важко оптимізувати, і на мікросхемі можуть виникати деякі виробничі дефекти, включаючи неповне покриття корпусом, утворення порожнеч та надмірне залишкове напруження. Формування пластику виконують приблизно при 175 °С. Найбільші напруження, які виникають в процесі корпусування, зумовлені невідповідністю КТР між кристалом кремнію та формувальним матеріалом. Пластмасова формувальна деформація створює напруження на поверхні кристалу кремнію, яке стягує і розтягує [25, с.37, 26, с.14].



### 2.2.3. Напруження, яке виникає під впливом вологості

Пластикові матеріали та сполуки, що використовуються для корпусування інтегральних схем (і більшості магнітних датчиків), є негерметичними [27, с.20]. Це призводить до того, що корпус поглинає вологу та розбухає в умовах підвищеної вологості [28, с.506], змінюючи напруження, прикладене до кремнієвого чипу, і, таким чином, змінюючи чутливість елемента Холла [29, с.230, 30, с.458] через п'єзо-ефект Холла.

Далі буде наведено результати проведення тесту, який показує вплив вологості на чутливість датчик струму на ефекті Холла [31, с.4482-4483]. Для тесту використовувалися готові комерційні датчики Холла. Пластик, який використовується для корпусування цих датчиків, створює стискаюче (негативне) напруження на поверхні кремнію при 25 °С, оскільки пластик має більший коефіцієнт теплового розширення ніж кремній. Перед кожним тестом датчик було попередньо поміщували у температурну камеру при 150 °С на декілька днів, для того щоб позбутися будь-якої вологи, присутньої на корпусі. Магнітне поле, необхідне для фіксування зміни чутливості, генерується постійним магнітом, який закріплено до задньої сторони датчика. Клей наносять між бічними гранями магніту і задньою стороною датчику дуже обережно, так, щоб на контактна поверхню між магнітом і датчиком не потрапив клей. Будемо вважати, що зовнішні фактори ніяким чином не будуть впливати на магнітне поле, яке генерується постійним магнітом.

На рис. 2.6. показано кріплення магніту до датчика струму у досліді.

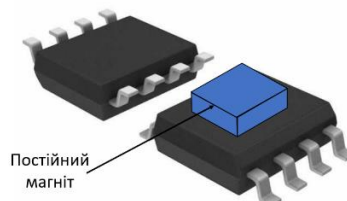


Рис. 2.6. Магнітний датчик струму з закріпленим магнітом на верхній частині

В першому досліді зразок було поміщено в середовище з відотною вологістю 90% при температурі 25 °C на десять днів. Вимірювання проводилися кожні півгодини. Потім вологу було вилучено з корпусу та проведено вимірювання знов при відносній вологості 90% та температурі 75 °C. На рис. 2.7 показано результати цього тесту.

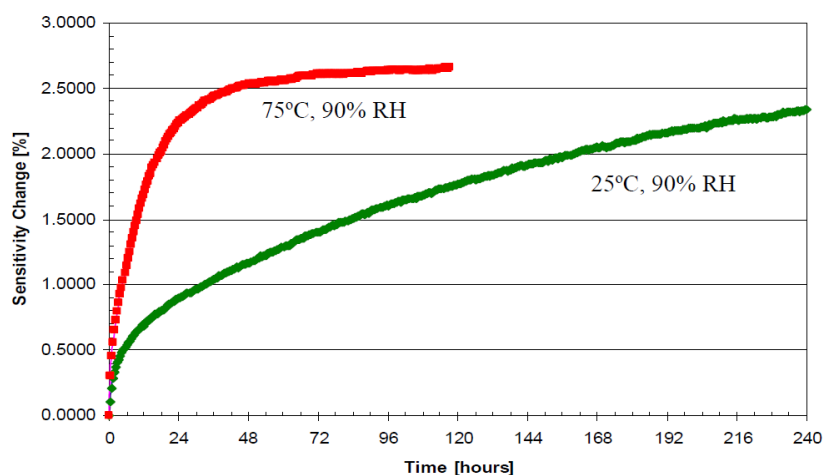


Рис. 2.7. Зміна чутливості впродовж першого досліді [31, с.4483]

Як видно з графіків, робоча температура сильно впливає на швидкість зміни чутливості датчика Холла. Зміна чутливості в позитивному напрямку свідчить про те, що корпус набухає, що в свою чергу спричиняє зменшення стискаючого (негативного) напруження в кремнії. Зміна чутливості сповільнюється та майже перестає зростати досягаючи відмітки приблизно 2.5%. Залежно від застосування датчика це значення зміни чутливості може бути дуже великим.

В другому досліді датчик Холла поміщають у камеру при температурі 25 °C та з відотною вологості 90% на 10 днів. Потім відносна вологість повітря змінюється до значення на 45%, при якій датчик буде знаходитись ще протягом 10 днів. Після цього відносна вологість встановлюється на рівень 90% знову. На рис. 2.8. показано як змінювалася чутливість датчика Холла з часом для цього експерименту.

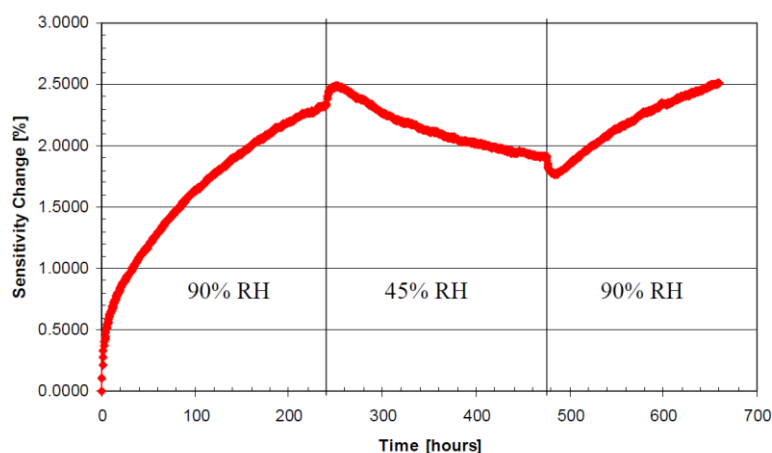


Рис. 2.8. Зміна чутливості впродовж другого досліді [31, с.4483]

Чутливість датчика Холла зростає при встановленні відносної вологості навколишнього середовища рівної 90%. Як тільки вологість знижується до 45%, чутливість починає зменшуватися. Чутливість буде продовжувати зростати, коли вологість буде встановлена на 90%. Цей експеримент підтверджує, що поглинання води пластиком є оборотним процесом. Також було помічено, що з'являються виплески при зміні відносної вологості з 90% до 45% і знову до 90%. Час встановлення для камери становить менше 30 хвилин, але тривалість виплеску становить приблизно одну добу. Пояснення цього ефекту вивчається, але на даний момент причина залишається невідомою.

Той самий експеримент повторювали при температурі 75 °C. На рис. 2.9. показано як змінювалася чутливість сенсора Холла під час третього досліді.

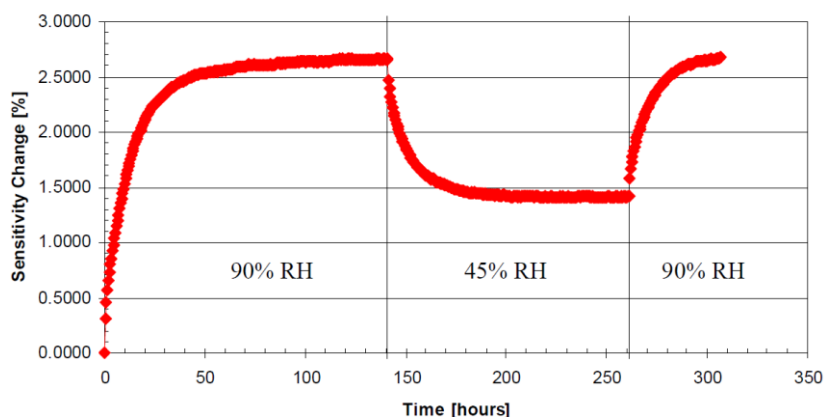


Рис. 2.9. Зміна чутливості впродовж третього досліді [31, с.4483]

Швидкість поглинання води пластиковим корпусом при цій температурі набагато швидша, ніж при 25 °С, що допомагає чіткіше оцінити процеси абсорбції та десорбції. Варто відзначити, що в цьому тесті виплески не спостерігаються.

В останньому досліді датчик спочатку поміщають у середовище з високою відносною вологістю 90% при температурі 25 °С. Приблизно через чотири дні температуру піднімають до 150 °С і тримають її такою протягом двох днів, щоб позбутися води на корпусі. Нарешті, температура знижується знову до 25 °С, а відносна вологість встановлюється на рівень 90%. На рис. 2.10. наведено зміну чутливості сенсора для цього дослідів .

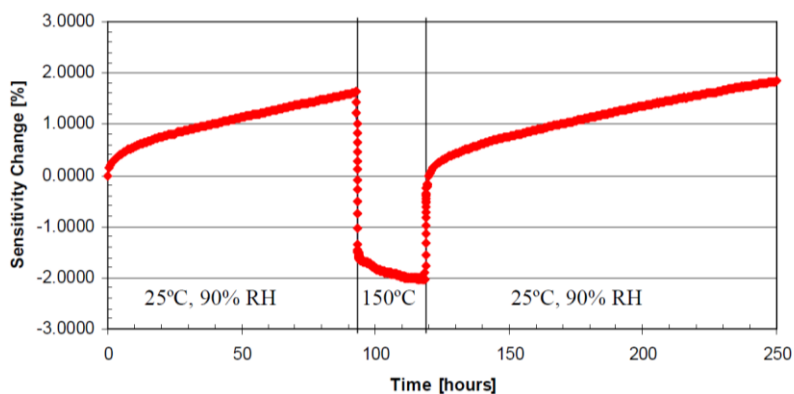


Рис. 2.10. Зміна чутливості впродовж четвертого дослідів [31, с.4483]

На рис. 2.11. порівнюються зміни чутливості для попередніх дослідів.

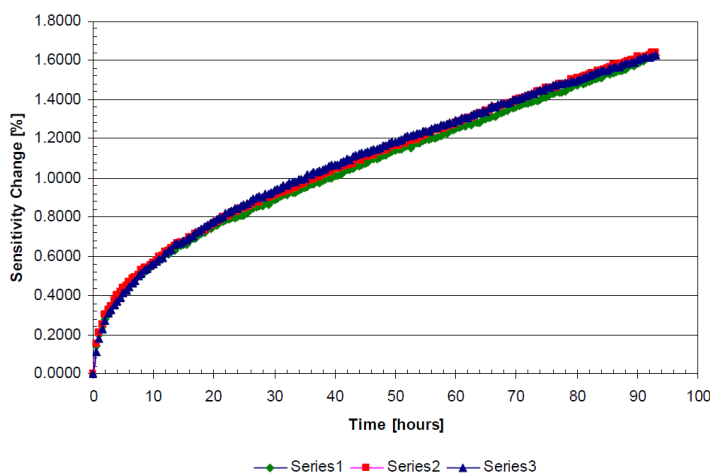


Рис. 2.11. Порівняння змін чутливості для трьох дослідів [31, с.4483]

Датчик Холла і поле, генеровані постійним магнітом, мають деякі невеликі температурні коефіцієнти, що пояснює падіння чутливості при зміні температури зовнішнього середовища від 25 °С до 150 °С.

З цього тесту можна отримати важливі висновки. По-перше, швидкість зміни чутливості і, отже, швидкість поглинання води пластиком корпусом для даної деталі є детермінованим та повторюваним явищем. По-друге, для матеріалів, що використовуються для цих датчиків, для того, щоб позбутися від всієї води з корпусу, достатньо дводенного перебування в 150 °С.

### 2.3. Ефекти в інтегральних мікросхемах, викликані напруженням

Внаслідок дії на матеріал чи на пристрій напруження можуть виникати деякі ефекти. Прикладами таких ефектів є п'єзореzystивний ефект, п'єзоелектричний ефект, п'єзофототронний ефект, п'єзоефект Холла та п'єзотунельний ефект.

Вектори електричного поля та щільності струму пов'язані тензором питомого опору  $\rho$ :

$$\vec{E} = \rho \vec{J}, \quad (2.7)$$

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \rho_{13} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \rho_{23} \\ \rho_{31} & \rho_{32} & \rho_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \end{bmatrix}. \quad (2.8)$$

П'єзореzystивний ефект описує зміну опору матеріалу при прикладенні до нього напруження. Зміни питомого опору можна визначити через тензор прикладених напружень  $\sigma$ , тензор п'єзоопору  $\pi$  і питомий опір при нульовому напруженні  $\rho_0$ .

$$\frac{\Delta \rho_{ij}}{\rho_0} = \sum_{k,l} \pi_{ijkl} \sigma_{kl}. \quad (2.9)$$

З міркувань симетрії, тензор напруження можна записати у наступному вигляді:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & \sigma_6 & \sigma_5 \\ \sigma_6 & \sigma_2 & \sigma_4 \\ \sigma_5 & \sigma_4 & \sigma_3 \end{bmatrix}. \quad (2.10)$$

Зміну питомого опора можна визначити як:

$$\frac{\Delta \rho_i}{\rho_0} = \sum_j \pi_{ij} \sigma_j, \quad (2.11)$$

Через те, що кристал кремнію має кубічну симетрію, тензор п'єзопору  $\pi$  має лише три незалежні коефіцієнти:

$$\pi_{ij} = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{bmatrix}. \quad (2.12)$$

Питомий опір можна виразити наступним чином:

$$\rho = \rho_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \rho_0 \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix}_0. \quad (2.13)$$

В табл. 2.2. наведені п'єзорезистивні коефіцієнти для кремнію при кімнатній температурі [32, 62].

Таблиця 2.2.

П'єзорезистивні коефіцієнти для кремнію при кімнатній температурі

Напівпровідник	$\pi_{11}, [10^{-11}/\text{Па}]$	$\pi_{12}, [10^{-11}/\text{Па}]$	$\pi_{44}, [10^{-11}/\text{Па}]$
n-типу	-102.2	53.4	-13.6
p-типу	6.6	-1.1	138.1

Коли напрямок щільності струму паралельний з напрямком електричного поля, як у довгому резисторі, п'єзоопір може бути виражений через поперечний коефіцієнт  $\pi_T$  та поздовжній коефіцієнт  $\pi_L$ . Опір резистора під дією напруження буде рівним:

$$R = R_0 (1 + \pi_L \sigma_L + \pi_T \sigma_T). \quad (2.14)$$

Для довгого резистора з довільною орієнтацією на площині 100 з кутом  $\phi$  до напрямку 100,  $\pi_T$  і  $\pi_L$  визначаються як [32, с.60]:

$$\pi_L = \pi_{11} - 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44} \cos^2 \phi \sin^2 \phi), \quad (2.15)$$

$$\pi_T = \pi_{12} + 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44} \cos^2 \phi \sin^2 \phi). \quad (2.16)$$

На рис. 2.12. зображено графічну репрезентацію поздовжнього та поперечного п'єзорезистивних коефіцієнтів в площині 100 за кімнатної температури.

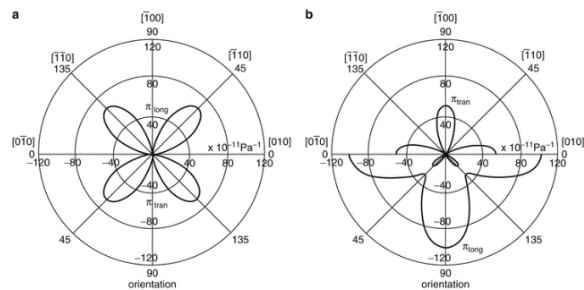


Рис. 2.12. Поздовжні та поперечні п'єзорезистивні коефіцієнти для кремнію 100 р-типу (ліворуч) та n-типу(праворуч)

На рис. 2.13. показано цю залежність п'єзорезистивних коефіцієнтів для кремнію від легуваності матеріалу.

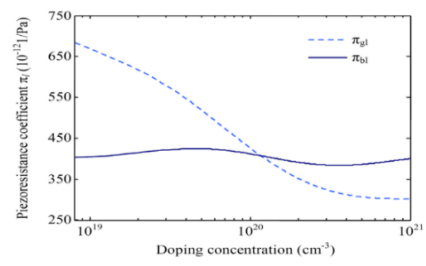


Рис. 2.13. Залежність п'єзорезистивних коефіцієнтів від рівня домішок для полікремнію



Для низького рівня домішок п'єзорезистивні коефіцієнти не змінюються, однак починають зменшуватися при більш високих рівнях концентрації домішок. Для некристалічних матеріалів, таких як полікремній, орієнтація резистора не впливає на його п'єзорезистивні коефіцієнти. Як і у випадку з кристалічним кремнієм, коефіцієнти будуть змінюватися залежно від концентрації легування.

Якщо присутнє магнітне поле, то рівняння 2.7 бути виглядати наступним чином [33, с.90]:

$$\vec{E} = \rho \vec{J} - (R_H \vec{B}) \times \vec{J}. \quad (2.17)$$

П'єзоефект Холла описує зміну коефіцієнта Холла внаслідок дії механічного напруження. Зміна коефіцієнта Холла може бути визначена через тензор прикладених напружень  $\sigma$ , п'єзо-Холл тензора  $P$  і коефіцієнт Холла нульового напруження  $R_{H0}$ .

$$\frac{\Delta R_{Hij}}{R_{H0}} = \sum_{k,l} P_{ijkl} \sigma_{kl}. \quad (2.18)$$

З точки зору симетрії тензор напружень знову може бути використаний у формі з простими суфіксами, тому 2.18 матиме вигляд:

$$\frac{\Delta R_{Hi}}{R_{H0}} = \sum_j P_{ij} \sigma_j. \quad (2.19)$$

Через симетрію кристалу кремнію п'єзо-Холл тензор  $P$  матиме лише три незалежні коефіцієнти:

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{12} & 0 & 0 & 0 \\ P_{12} & P_{11} & P_{12} & 0 & 0 & 0 \\ P_{12} & P_{12} & P_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{44} \end{bmatrix}. \quad (2.20)$$

Тензор коефіцієнта Холла тепер може бути виражений як:

$$R_H = R_{H0} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + R_{H0} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{12} & 0 & 0 & 0 \\ P_{12} & P_{11} & P_{12} & 0 & 0 & 0 \\ P_{12} & P_{12} & P_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix}_0. \quad (2.21)$$

В табл. 2.3. наведено коефіцієнти п'єзо-Холла для кремнію n-типу [33, с.92].

Таблиця 2.3.

П'єзо-Холл коефіцієнти для слаболегованого кремнію при кімнатній температурі

$P_{11}, [10^{-11}/\text{Па}]$	$P_{12}, [10^{-11}/\text{Па}]$	$P_{44}, [10^{-11}/\text{Па}]$
-93	45	6

Для елемента Холла, поміщеного в корпус, виконаного на пластині 100, дотичні складові напруження, яке діє поза площиною, зазвичай набагато менші, ніж складові напруження, яке діє в межах площини [34, с.1150]. Подібним чином, дотична складова напруження  $\sigma_6$ , яка діє в площині, майже зникає на відстані до краю кремнію, яка рівна товщині пластини [32, с.1151]. Таким чином, єдиними вагомими складовими напруження є нормальні складові напруження, яке діє в площині, та нормальна складова напруження, яке діє поза площиною. Таким чином, зміну чутливості датчика Холла керованого струмом, реалізованих у площині 100, внаслідок дії напруження можна записати як [35, с.278]:

$$\frac{\Delta S_I}{S_I} = P_{12}(\sigma_1 + \sigma_2) + P_{11}\sigma_3. \quad (2.22)$$

Цікаво відзначити, що для цієї конкретної площини 100 п'єзо-ефект Холла є ізотропним, що означає, що обертання елемента Холла на площині не змінить залежність між напруженням та зміною чутливості.

Оскільки кремній та пластмасові сполуки, що використовуються для корпусування датчиків, мають різні коефіцієнти розширення, як тільки розплавлена пластмасова сполука, прикладена до кремнію, починає охолоджуватися, на периферії кремнію та корпусу виникає напруження. Це напруження змінюватиметься з робочою температурою, внаслідок чого чутливість елемента Холла змінюватиметься внаслідок п'єзоефекту Холла [36, с.248].

### **Висновки до другого розділу**

У розділі було досліджено явище напруження. Теоретично було проаналізовано механізми його виникнення. Особливу увагу було приділено напруження в інтегральних мікросхемах, а саме в сенсорах Холла.

Напруження в інтегральних мікросхем зазвичай виникає в процесі виробництва: фабрикації та корпусування. Це пояснюється тим, що під час виготовлення чипів різні матеріали взаємодіють між собою. Саме різниця між коефіцієнтами термічного розширення кремнію та інших матеріалів є основною причиною виникнення термомеханічного напруження. Також напруження виникає під час довготривалої експлуатації мікросхеми. Причиною цього є зміна рівню вологості навколишнього середовища, температури та інших зовнішніх факторів.

Дія напруження призводить до п'єзорезистивного ефекту, п'єзо-Холл ефекту. Внаслідок п'єзорезистивного ефекту змінюється опір матеріалів, а внаслідок п'єзо-Холл ефекту змінюється коефіцієнт Холла. В результаті цих явищ чутливість елемента Холла змінюється, що може бути критичним для цілого ряду застосувань. Саме тому задача розробки схеми компенсації дії напруження є актуальною.

У наступному розділі буде досліджено особливості виготовлення інтегральних сенсорів струму. Буде розроблено власний сенсор струму на ефекті Холла для якого потім буде впроваджено схему компенсації дії напруження.

## 3 ОСОБЛИВОСТІ ПРОЄКТУВАННЯ СЕНСОРІВ СТРУМУ НА ЕФЕКТІ ХОЛЛА

### 3.1. Джерело опорної напруги

Джерело опорної напруги є дуже важливим елементом будь-якої інтегральної схеми. Воно необхідно, для створення опорних струмів та інших опорних напруг, які будуть виводити елементи схеми на їх робочі точки. Головною вимогою до проєктування опорних джерел напруги є їх незмінність при змінах робочих температур. На разі відомо декілька способів створення опорної напруги, однак найбільш широко використовуваним є бандгап. На рис. 3.1. показано функціональну блок-схему бандгапу.

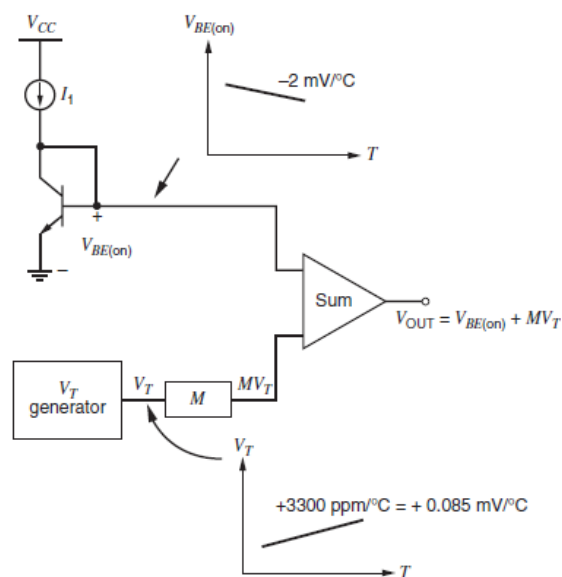


Рис. 3.1. Функціональна блок-схема бандгапу

Основною ідеєю бандгапів є додавання двох напруг, одна з яких має додатний температурний коефіцієнт, а друга – від’ємний, так щоб їх сумою була температурно незалежна напруга [37, с.316]. Найчастіше в ролі напруги з додатнім температурним коефіцієнтом обирають термальну напругу р-п

переходу, а в ролі напруги з від'ємним температурним коефіцієнтом – напругу база-емітер біполярного транзистора.

В ході даної роботи було розроблено бандгап. На рис. 3.2. представлено його схему.

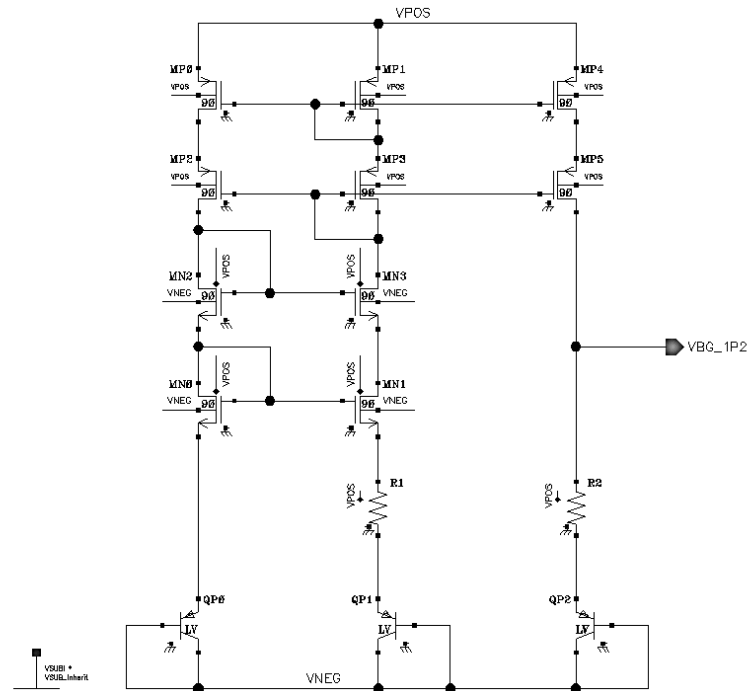


Рис. 3.2. Схема бандгапу

Дана схема спричинить протікання в резисторі R1 струму:

$$I_{R1} = \frac{V_T}{R_1} \ln \frac{I_{S1}}{I_{S0}}, \quad (3.1)$$

де  $V_T$  – термальна напруга,  $I_S$  – тепловий струм.

Цей струм буде скопійований у наступну гілку праворуч, таким чином, що протікання цього струму в гілці призведе до утворення температурно незалежної напруги:

$$V_{BG} = V_{BE2} + I_{R1} R_2 = V_{BE2} + V_T \frac{R_2}{R_1} \ln \frac{I_{S1}}{I_{S0}}. \quad (3.2)$$

Для запропонованої схеми було виконано імовірнісні Монте-Карло симуляції. Симуляції проводилися при напрузі живлення 2.8В, 3.3В, 3.6В по

200 вибірок для кожного значення напруги. На рис. 3.3. зображено результати симуляцій для залежності опорної напруги від температури.

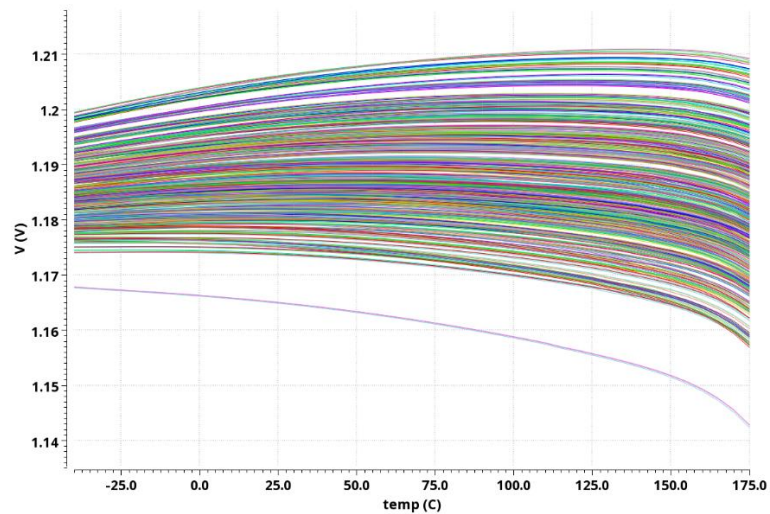


Рис. 3.3. Залежність опорної напруги від температури

Також, на основі цього опорного джерела напруги можна створити опорне джерело струму 2.5мкА. На рис. 3.4. зображено результати симуляцій для залежності опорного струму від температури.

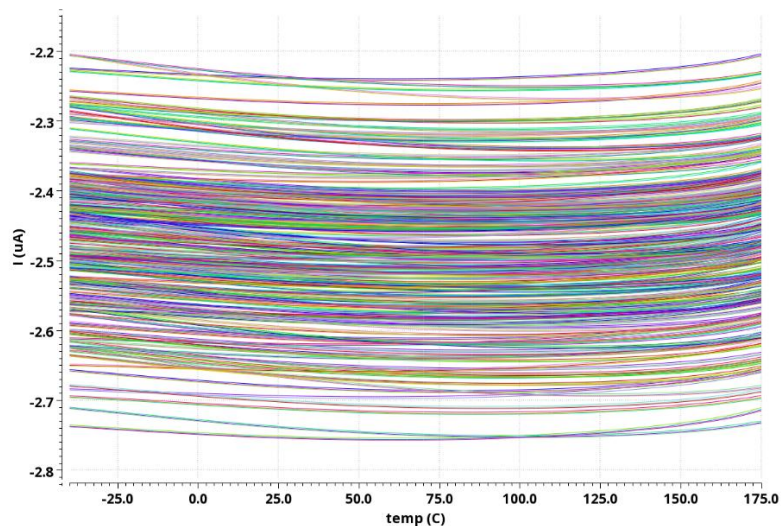


Рис. 3.4. Залежність опорного струму від температури

З отриманих графіків видно, що струм може приймати різні значення від 2.2мкА до 2.75мкА, проте для багатьох корнерів це значення приблизно

становить 2.5мкА. Зазвичай в інтегральні схеми додають можливість тримувати значення струму та напруги бандгапу. Завдяки тримуванню можна вивести значення струму та напруги на бажане значення.

### 3.2. Елемент Холла та драйвер

Інтегральні пристрої виготовляються на кремнієвих підкладках шляхом легування домішками для створення областей носіїв n-типу або р-типу. Із цих легованих областей типу формуються просторові об'єкти, які являють собою активні та пасивні компоненти інтегральної схеми, включаючи елемент Холла. Всі ці складові активні та пасивні компоненти електрично з'єднуються між собою шарами металів. Оскільки просторові об'єкти дуже малі, в діапазоні мікрометрів, а іноді навіть менше, щільність електричної схеми надзвичайно висока, що дозволяє створювати складні схеми на дуже малій площі кремнію.

Той факт, що всі активні та пасивні елементи вирощуються в кремнієвій підкладці або наносяться на неї, робить їх невіддільними від кремнію і справді ідентифікує їх як монолітні інтегральні схеми. На рис. 3.5 показано як виглядає елемент Холла у розрізі.

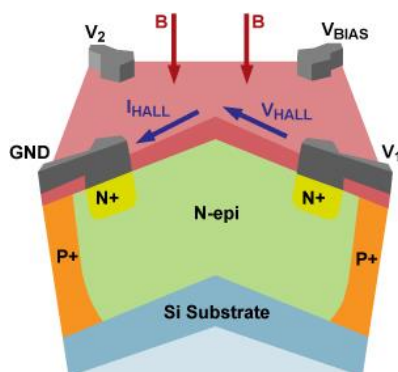


Рис. 3.5. Елемент Холла у розрізі

Елемент Холла являє собою область легованого кремнію, яка створює пластину n-типу, яка буде проводити струм. Як згадувалося раніше, коли струм



протікає з одного кута пластини до протилежного кута, напруга Холла виникне на двох інших кутах пластини, коли буде присутнє перпендикулярне магнітне поле. Напруга Холла буде дорівнювати нулю, якщо не прикладено ніяке поле.

На рис. 3.6. показано як буде виглядати елемент Холла разом з драйвером.

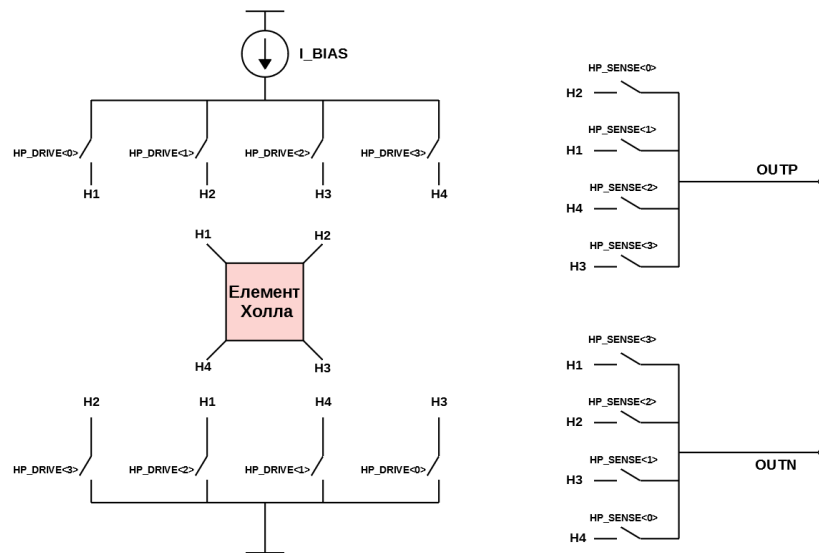


Рис. 3.6. Елемент Холла та драйвер

Ключі та їх конфігурації забезпечують часове усереднення, як це було описано раніше. На рис. 3.7. зображено сигнали управління ключами драйвера.

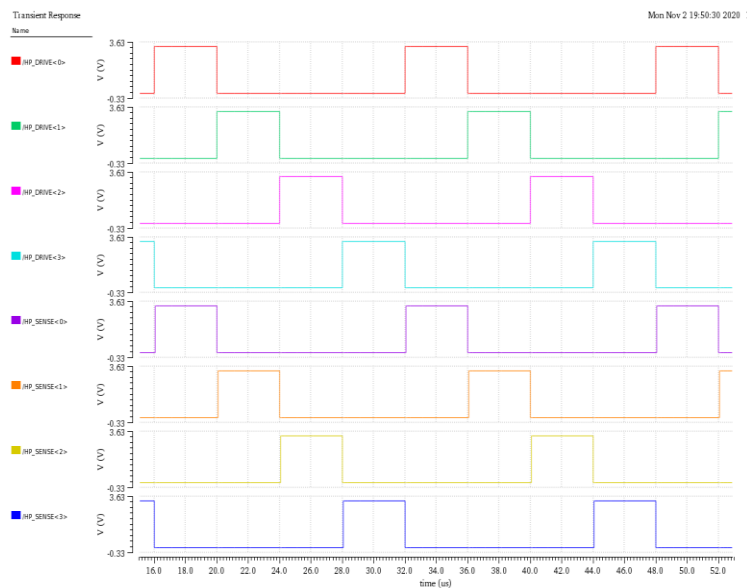


Рис. 3.7. Сигнали перемикання ключами

Сигнали управління створюються в цифрових блоках. Сигнали HP\_SENSE мають починатися на 62.5нс пізніше ніж сигнали HP\_DRIVE. Це пов'язано з перехідними процесами. Якщо одночасно перемикає ці сигнали, то у зв'язку з можливими затримками сигналів, можливим буде випадок під'єднання струму зміщення до тієї ж самої діагоналі на якій проводиться вимірювання, в результаті на виході системи буде спайк – сплеск напруги.

Ключ, який підключає елемент Холла до плюсу джерела струму являє собою PMOS транзистор. На рис.3.8. зображено цей ключ.

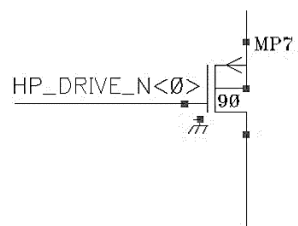


Рис. 3.8. Ключ на PMOS транзисторі

Ключ, який підключає елемент Холла до землі являє собою NMOS транзистор. На рис.3.9. наведено такий ключ.

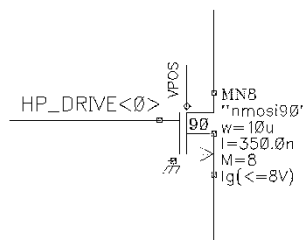


Рис. 3.9. Ключ на NMOS транзисторі

Ключі, які керують протіканням струму зміщення мають бути великими, широкими в ширину і вузькими в довжину для того щоб пропускати великий струм (до 2мА). Ключі, які керують вибором точок вимірювання напруги можуть бути значно меншими, однак їх необхідно робити на комплементарній парі, оскільки напруга синфазного складової для сигналів, які проходять через

них знаходиться на нечітко визначеному рівні близько середини живлення. На рис. 3.10. показано ключ реалізований на комплементарній парі транзисторів.

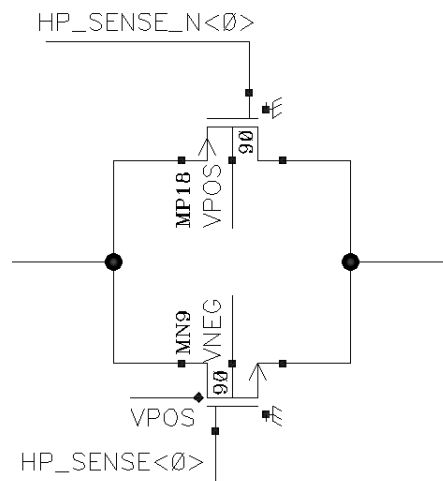


Рис. 3.10. Комплементарний ключ

Проектування струму зміщення також становить складність. Складність полягає в тому, що елемент Холла веде себе як опір з позитивним температурним коефіцієнтом і на високих температурах це може призвести до небажаного хедруму. Тому струм зміщення проєктують так, щоб він мав від'ємний температурний коефіцієнт. Струм отримують за допомогою бандгапного джерела напруги. На рис. 3.11. представлено спроектоване джерело струму.

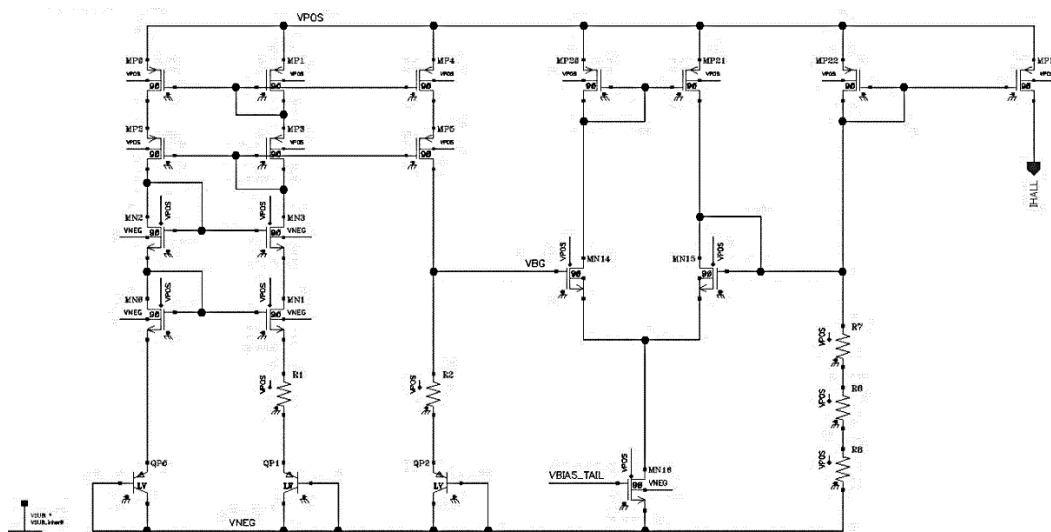


Рис. 3.11. Струм зміщення елемента Холла

Для такого драйвера компоненти і їх номінали підбрано таким чином, щоб напруга бандгапу і вихідний струм мали негативний температурний коефіцієнт. На рис. 3.12. показано опорну напругу з від'ємним температурним коефіцієнтом.

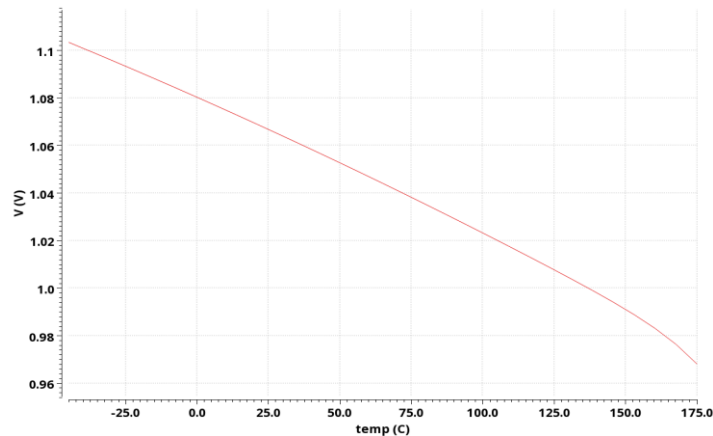


Рис. 3.12. Опорна напруга з від'ємним температурним коефіцієнтом

На рис. 3.13. показано отриманий в результаті проектування струм зміщення з від'ємним температурним коефіцієнтом.

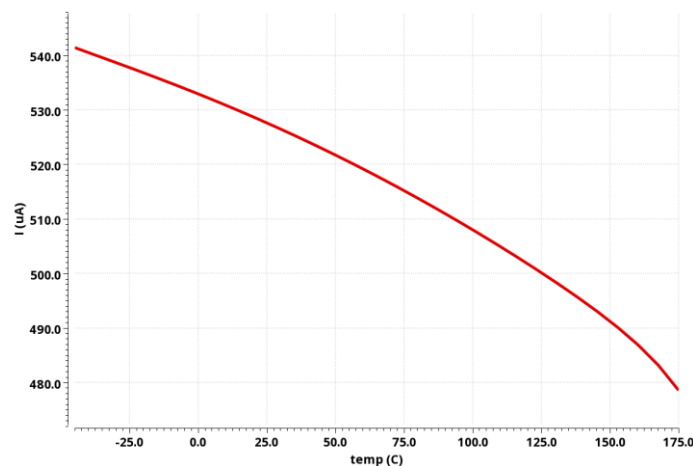


Рис. 3.13. Струм зміщення елемента Холла

Драйвер для елемента Холла також повинен мати коло зворотного зв'язку для синфазної складової сигналу. Це потрібно для того, щоб зафіксувати синфазну напругу на виході з елемента Холла на певному рівні. Якщо такої

ланки не буде у схемі, то будь-які зміни в синфазній напрузі будуть сприйматися наступним підсилювачем як корисний сигнал, тобто це призведе до похибки. На рис. 3.14. показано схему ланки зворотного зв'язку для драйвера.

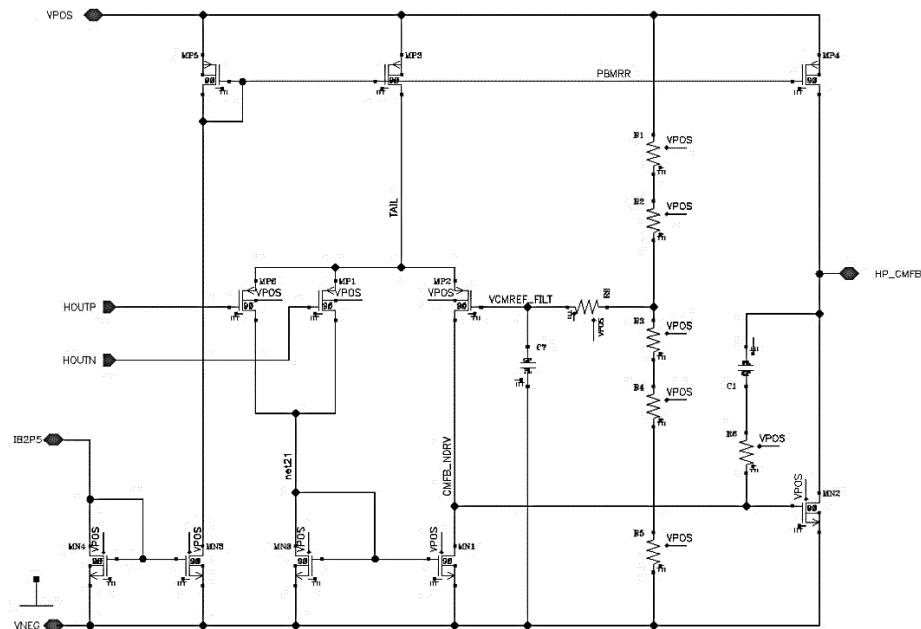


Рис. 3.14. Схема зворотнього зв'язку для синфазної складової

Схема працює наступним чином: резистивний дільник створює напругу 0.7V, яка проходячи через фільтр потрапляє на вхід підсилювача, на інші входи якого подаються напруги з виходу елемента Холла. Вихід блоку зворотного зв'язку під'єднано до кута елемента Холла протилежного до кута, до якого прикладається струм зміщення. Якщо температура зросте, це призведе до збільшення опору елемента Холла, що в свою чергу призведе до збільшення синфазної напруги. Якщо синфазна напруга зросте, це призведе до того, що напруга на затворі транзистора MN2 зросте. Транзистор привідкриється, що призведе до падіння напруги на його витці. Виток цього транзистора під'єднано до елемента Холла, а отже і напруга на його провідній діагоналі зменшиться, що призведе до зменшення синфазної складової напруги. Зворотній зв'язок намагатиметься тримати синфазну напругу на рівні 0.7V.

Оскільки в схему вводиться схема зворотного зв'язку, то виникає потреба оцінити стабільність схеми. Для цього буде проведено «stb» аналіз. На рис. 3.15. показано результати «stb» аналізу.



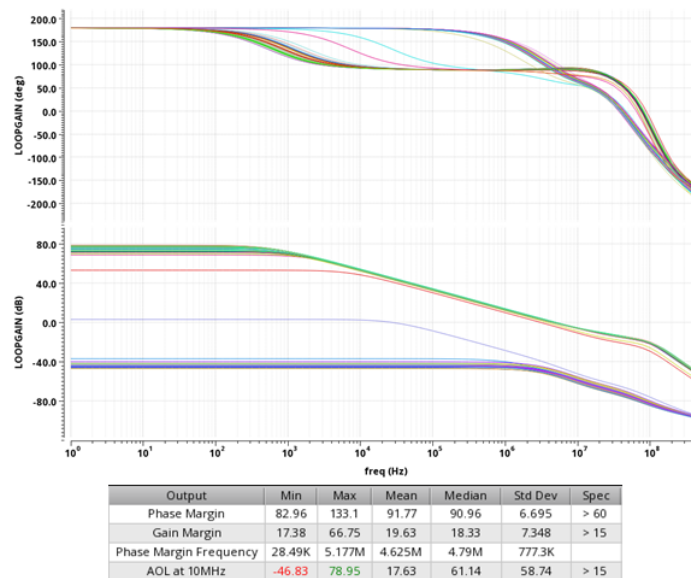


Рис. 3.15. Результати stb аналізу

На графіках ФЧХ видно, що на високих температурах коефіцієнт підсилення менше одиниці, і через це здається, що схема має проблеми зі стабільністю, але це не так. На високих температурах опір елемента Холла зростає настільки, що транзистор MN2 в колі зворотного зв'язку переходить у тріодний режим і повністю відкривається, тому на його витоці буде нульовий потенціал. Однак, такий режим роботи допустимий, і це ніяк не відобразиться на стійкості. Оскільки запас за фазою більше 45 градусів для всіх корнерів, то систему вважаємо стабільною.

На рис. 3.16. показано сигнал, який буде на виході такого драйвера.

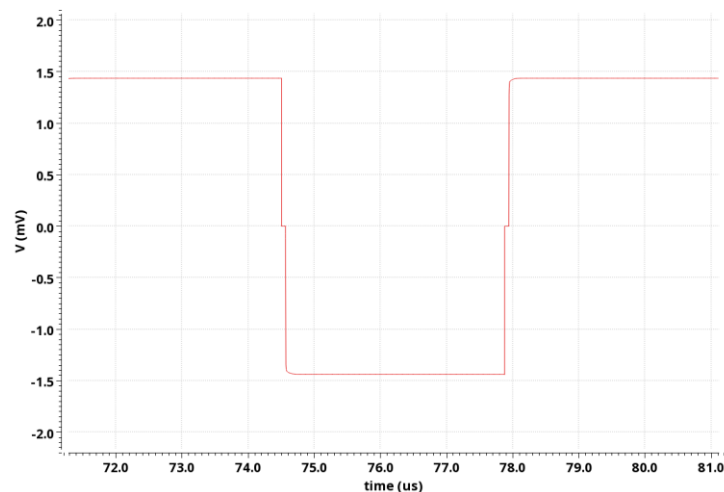


Рис. 3.16. Сигнал з елемента Холла

### 3.3. Аналоговий фронт-енд та АЦП

Сигнал, який приходить з елемента Холла, дуже малий – до 10мВ. Тому існує необхідність підсилити цей сигнал для подальшої обробки. Зазвичай усі підсилювачі, які знаходяться між елементом Холла та АЦП, називаються разом аналоговий фронт-енд. Для цього сенсора використовуватимуться два підсилювачі: перший – підсилювач крутизни, другий – трансімпедансний підсилювач. На рис. 3.17. показано функціональну блок-схему аналогового фронт-енду.

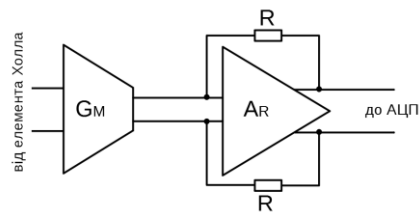


Рис. 3.17. Аналоговий фронт-енд

Для цього підсилювача вхідним сигналом є диференційна напруга, а вихідним – диференційний струм. Цей підсилювач також виступає у ролі анти-еліасінг фільтра для АЦП. На рис. 3.18. зображено схему підсилювача крутизни.

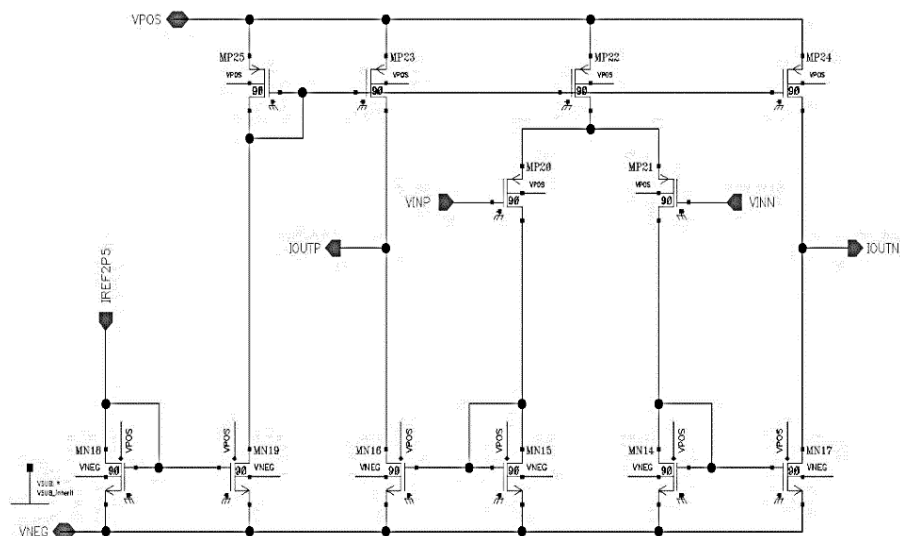


Рис. 3.18. Підсилювач крутизни

Наступним у ланці є трансрезистивний підсилювач. Для цього сенсора він буде розроблений за архітектурою фолдед каскода. На рис. 3.19. зображено схему такого підсилювача.

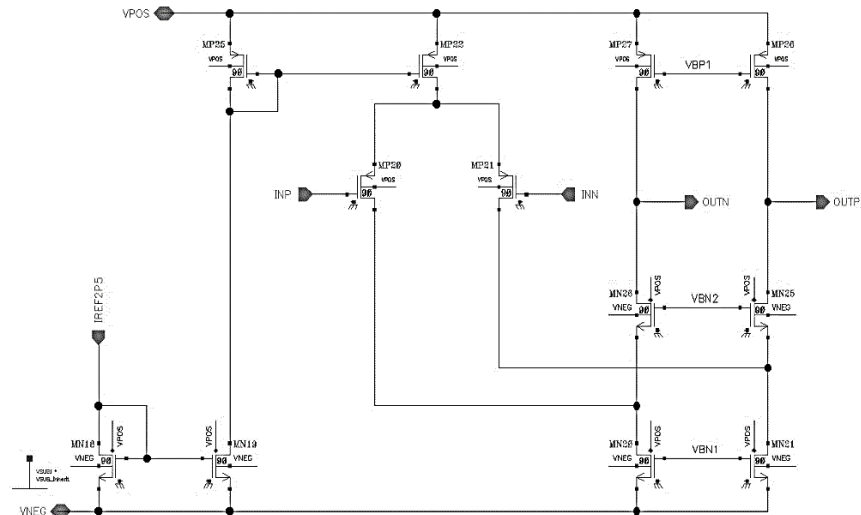


Рис. 3.19. Трансімпедансний підсилювач

Повністю диференційний підсилювач потребує схеми зворотного зв'язку для синфазної складової сигналу. На рис. 3.20. представлено ланку зворотного зв'язку для синфазної складової

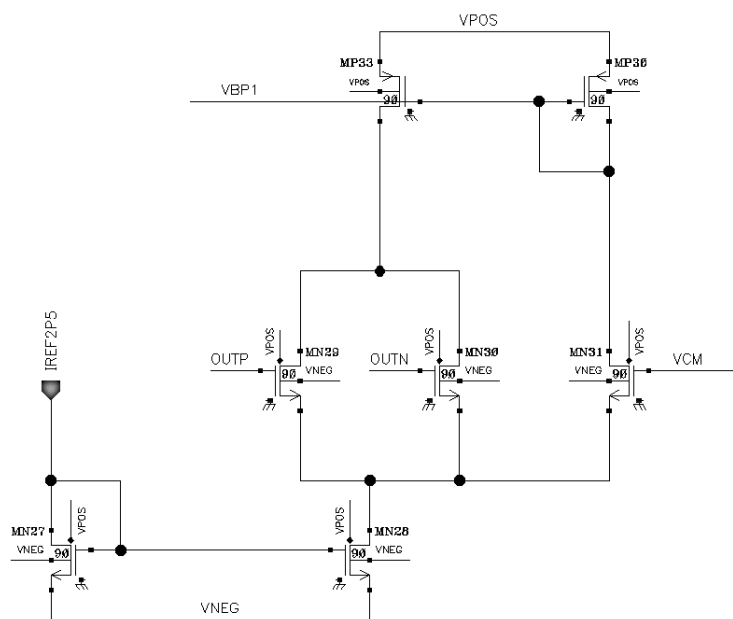


Рис. 3.20. Зворотний зв'язок для синфазної складової

Після підсилення аналогового сигналу, його необхідно перетворити в цифровий сигнал за допомогою АЦП. Для таких сенсорів струму на ефекті Холла найчастіше використовують сигма-дельта модулятори як АЦП. Сигма-дельта АЦП складається з двох частин: модулятор і цифровий ФНЧ. Модулятор перетворює вхідну напругу в послідовність імпульсів, а ФНЧ формує вихідний код. На рис. 3.21. зображено сигма-дельта модулятор.

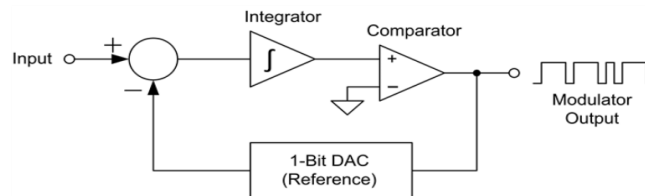


Рис. 3.21. Сигма-дельта модулятор

Висока точність аналого-цифрового перетворення, що здійснюється в сигма-дельта АЦП, обумовлено, перш за все, можливістю отримання вищої розрядності і лінійності перетворення без застосування додаткових багаторівневих порогових пристроїв і, крім того, ефективної фільтрації перетворюється сигналу. Сучасний сигма-дельта АЦП складається з сигма-дельта модулятора і цифрового перетворювача - децимуючого цифрового фільтра. Особливості сигма-дельта АЦП, що відрізняють його від інших видів, є те, що перетворений сигнал спочатку квантується в модуляторі, а потім дискретизується в перетворювачі. Квантування здійснюється в часі за допомогою послідовності тактових імпульсів. Зазвичай в АЦП інших видів відліки перетворюється аналогового сигналу беруться в точках дискретизації і є його миттєвими значеннями в цих точках. На відміну від цього, в сигма-дельта АЦП підрахунки беруться на інтервалів дискретизації і є, відповідно, середніми значеннями перетворюється сигналу на цих інтервалах.

Вихідним сигналом звичайного однорозрядного сигма-дельта модулятора є синхронізована послідовність ненульових і одиничних посилок, загальна частота проходження яких дорівнює тактовій частоті  $f_T$ . Під нульовими

одиночними посилками в даному випадку будемо розуміти посилки зі значенням 0 і 1 тривалістю:

$$\tau = \frac{1}{f_T}. \quad (3.3)$$

Вихідним сигналом перетворювального (децимуючого) фільтра і, відповідно, АЦП в цілому є багаторозрядний цифровий сигнал, частота відліків дискретизації якого дорівнює  $f_D$ . Тактова частота, що синхронізує роботи модулятора і є по відношенню до  $f_D$  частотою передискретизації, зазвичай вибирається рівною:

$$f_T = K f_D, \quad (3.4)$$

де  $K = 2^N$  – коефіцієнт передискретизації, а  $N$  – розрядність АЦП.

В інших АЦП (наприклад, з пристроєм вибірки і зберігання), відповідно до теореми Котельникова, частотний спектр перетворюється сигналу разом з супроводжуючим його шумом повинен бути в межах від 0 до  $f_D / 2$ . Тому на вході АЦП використовують аналоговий ФНЧ з відповідною пропускнуою здатністю. Для сигма-дельта АЦП умови менш жорсткі: при тій же ширині спектра вхідного сигналу його вхідна фільтрація може бути з пологим спадом в межах від  $f_T / 2$  до  $f_D / 2$  і, відповідно, без істотних частотних і фазових спотворень в смузі пропускання. Лише потім в перетворюючому або додатковому фільтрі здійснюється ефективна цифрова фільтрація з пропускнуою здатністю від 0 до  $f_D / 2$  і придушенням шуму за її межами. Крім цього частота відліків фільтрації знижується (децимується) від  $f_T$  до  $f_D$ .

### Висновки до третього розділу

Отже, було спроектовано аналогову частину інтегрального сенсора струму на ефекті Холла. Головними компонентами є опорне джерело напруги та струму, драйвер елемента Холла та аналоговий фронт-енд. Драйвер елемента Холла побудований таким чином, щоб виконувати динамічну компенсацію напруги зміщення елемента Холла. Це реалізовано за допомогою використання ключів та спеціальної послідовності комутуючих сигналів. Аналоговий фронт-енд складається з двох послідовних підсилювачів. Для таких датчиків струму необхідно мати АЦП для подальшої цифрової обробки сигналу. В цій роботі проєктування АЦП не розглядається, але аналогова частина розроблена так, щоб вона була сумісна з сигма-дельта АЦП. Для всіх компонентів було проведено Монте-Карло симуляції для перевірки роботи на різних температурах в діапазоні від -40 до 175 градусів, а також в діапазоні напруги живлення від 2.8В до 3.6В. Для елементів, у яких присутні ланки зворотного зв'язку, було проведено stb аналіз, для визначення стабільності в робочому частотному діапазоні. Було проведено аналіз отриманих результатів. Результати симуляцій задовольняють автомобільним вимогам та специфікаціям.

Компенсація впливу напруження є темою наступного розділу, в результаті чого буде запропоновано і реалізовано схему компенсації дії напруження.

## 4 КОМПЕНСАЦІЯ ДІЇ НАПРУЖЕННЯ ДЛЯ СЕНСОРІВ СТРУМУ НА ЕФЕКТИ ХОЛЛА

### 4.1. Існуючі методи компенсації напруження. Магнітна компенсація

Під час дії напруження на матеріал, опір цього матеріалу буде змінюватися внаслідок п'єзореzystивного ефекту. Опір резистора під дією напруження буде визначатися за формулою 2.14:

$$R = R_0 (1 + \pi_L \sigma_L + \pi_T \sigma_T), \quad (4.1)$$

де  $R_0$  – опір резистора при відсутності напруження,  $\pi_L, \pi_T$  – п'єзореzystивні коефіцієнти,  $\sigma_L, \sigma_T$  – значення прикладених напружень.

Напруження на поверхні кремнієвої мікросхеми зазвичай можна умовно вважати однорідним в невеликих межах [38, с.1229]. Таким чином, якщо розмістити резистори близько до елементів Холла, то інформація про зміну опору цих резисторів внаслідок дії напруження може бути використана для компенсації дрейфу чутливості елементів Холла [39, с.1481].

Основна проблема використання п'єзореzystивного ефекту для виявлення змін напружень пов'язана з тим, що опір інтегрованих резисторів залежить не тільки від напруження, але і від температури. Для того, щоб знати, чи зміна опору обумовлена напругою або перепадами температур, необхідно застосувати вимірювання температури. Інформацію, отриману від датчика температури, можна використовувати для скасування змін опору викликаних зміною температури.

Коефіцієнт підсилення системи визначається як відношення вихідного сигналу до вхідного. Якщо потрібно знайти коефіцієнт підсилення лінійної системи, на вхід системи може бути подано сигнал з відомою амплітудою, в той час як буде вимірюватися сигнал на виході. Будь-які подальші зміни вихідного сигналу буду вказувати на те, що коефіцієнт підсилення системи змінився.



Якщо датчик Холла розміщений під магнітним сигналом відомої сили, той самий принцип може бути застосований для отримання чутливості Холла та виявлення змін цього значення чутливості.

Опорний магнітний сигнал може бути згенерований або постійним магнітом, або котушкою індуктивності. Якщо використовується постійний магніт, то відстань від магніту до пластини Холла, а також напруженість магнітного поля слід підтримувати постійними в різних зовнішніх умовах. Якщо, з іншого боку, використовується дискретна котушка, її структура, відстань від котушки до пластини Холла та струм, що протікає через котушку, повинні залишатися незмінними. Зазвичай усіх цих вимог важко досягти з необхідною величиною точності.

Якщо замість дискретної котушки інтегрувати її в кремнієву мікросхему, її геометрія та відстань до пластини Холла залишаться майже постійними зі змінами температури та вологості. Якщо струм зміщення котушки тримувати так щоб, цей струм залишався температурно незалежним, в результаті буде отримано магнітне поле постійної величини.

Опорне магнітне поле повинно відрізнятися від зовнішнього магнітного поля, що може бути реалізовано або за допомогою часового мультиплексування, або за допомогою просторового розділення полів. Для магнітних датчиків з одним чутливим елементом просторове розділення неможливе. Часове мультиплексування за допомогою постійних магнітів реалізувати практично майже неможливо, оскільки необхідно було б змінювати полярність магніту, фізично перевертаючи його, і було б неможливо вимкнути його магнітне поле. Через ці проблеми рішення, яке використовувало би постійні магніти потрібно відкинути. З іншого боку, напрямок струму в інтегрованій котушці можна легко перемикаєти, тому, за умови дотримання частоти Найквіста, можна досягти часового мультиплексування.

Розглянемо в ролі опорного джерела інтегровану котушку індуктивності через яку буде протікати постійний струм. На рис. 4.1 зображено як може бути реалізована така схема компенсації.

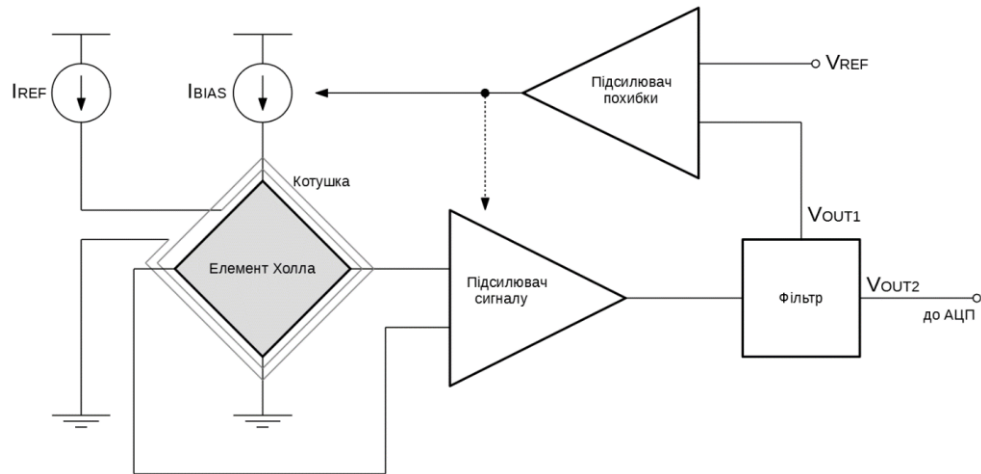


Рис. 4.1. Схема компенсації напруження за допомогою інтегрованої котушки індуктивності

Інтегральну котушку індуктивності розташовано навколо елемента Холла, яка буде генерувати постійне магнітне поле, за умови протікання через неї постійного опорного струму  $I_{REF}$ . Для того щоб відрізнити напругу Холла, яка виникає під дією зовнішнього магнітного поля, від напруги, яка виникає під дією поля котушки, опорний струм котушки включають в зворотному напрямку і навпаки на частоті близько десятків герц. Ця частота набагато менша за частоту динамічної компенсації зміщення елемента Холла. Низькочастотний фільтр, побудований таким чином, що він пропускає сигнал робочої частоти (частоти динамічної компенсації зміщення) на АЦП в той час як сигнали низької частоти спрямовуються на підсилювач похибки.

Нехай  $V_{OUT1}$  – сигнал на виході фільтра, який під'єднано до входу підсилювача похибки, тоді:

$$V_{OUT1} = B_{REF} S_I I_{BIAS} A, \quad (4.2)$$

де  $B_{REF}$  – постійне магнітне поле, яке генерується котушкою,  $S_I$  – чутливість елемента Холла,  $I_{BIAS}$  – струм зміщення елемента Холла,  $A$  – коефіцієнт підсилення підсилювача сигналу.

Нехай компенсація здійснюється шляхом керування струмом зміщення елемента Холла, тоді:

$$I_{BIAS} = A_{fb} (V_{REF} - V_{OUT}), \quad (4.3)$$

де  $A_{fb}$  – коефіцієнт підсилення ланки зворотного зв'язку, що включає в себе коефіцієнт підсилення підсилювача похибки;  $V_{REF}$  – опорна напруга, яка стійка до дії напруження.

Таким чином, утвориться негативний зворотній зв'язок, який буде компенсувати дію зміни чутливості:

$$V_{OUT1} = \frac{B_{INT} S_I A A_{fb} V_{REF}}{1 + B_{INT} S_I A A_{fb}}. \quad (4.4)$$

В свою чергу, цей струм зміщення буде впливати на більш високочастотну основну частину схеми, що і являє собою компенсацію дії напруження. Також можливий варіант компенсації за рахунок керування параметрами підсилювача сигналу.

Можливі також варіанти, коли компенсація проводиться за допомогою цифрових обчислень в мікросхемі. Для цього використовують калібрувальні вимірювання напруги Холла з ввімкненим та вимкненим струмом котушки. Далі за допомогою формул та алгоритмів, в залежності від архітектури аналогової частини, проводиться корекція значень вимірів з елемента Холла, що і являє собою процес компенсації.

Отже, використання інтегральної котушки індуктивності для магнітної компенсації в аналоговій частині є перспективним рішенням, оскільки така компенсація є простою, не потребує додаткових схемотехнічних елементів, не потребує калібрувальних обчислень, а також її можна зробити температурно незалежною. Саме тому так магнітна компенсація в аналоговій частині стає предметом подальшого дослідження.

## 4.2. Проектування та розрахунки схеми магнітної компенсації

В роботі буде використано котушку, яка вже була спроектована компанією Sonata IC Design. Вона утворена зі слоїв трьох рівнів металу. Дана котушка має опір 70Ом, при цьому її індуктивність становить 6.62нГн. При протіканні через котушку струму номіналом 5мА виникне магнітне поле з середнім значенням 11Гс. На рис. 4.2. показано інтегровану котушку індуктивності.

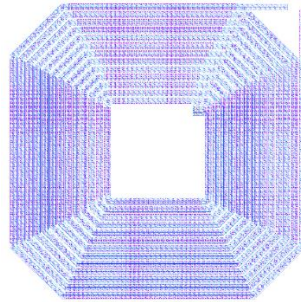


Рис. 4.2. Котушка для магнітної компенсації

Через котушку має протікати струм, який може змінювати напрям свого протікання. На рис. 4.3. наведено спроектований драйвер для котушки разом з ключами.

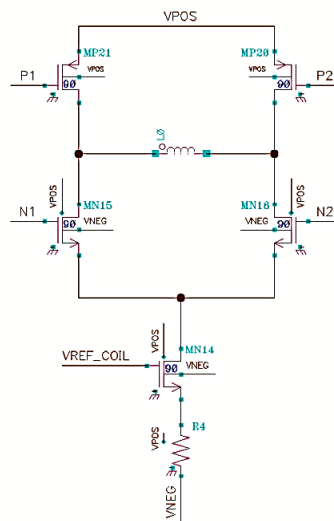


Рис. 4.3. Драйвер котушки

Для того, щоб відрізнити сигнал котушки від сигналу зовнішнього магнітного поля необхідно модулювати опорний сигнал, це здійснюється шляхом зміни напрямку протікання струму через котушку. Котушка може працювати в наступних режимах:

- 1) виключена;
- 2) знаходиться в стані очікування;
- 3) струм тече в прямому напрямі;
- 4) струм тече в зворотному напрямі.

На рис. 4.4. показано схеми можливих включень котушки.

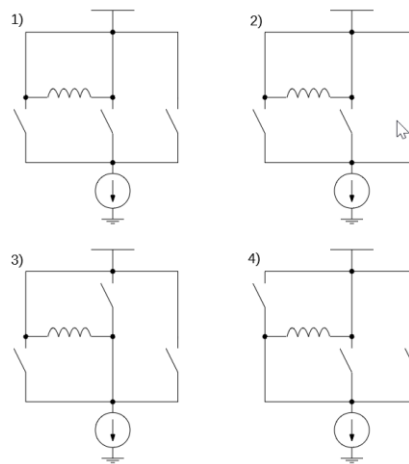


Рис. 4.4. Функціональна блок-схема ФНЧ

Далі необхідно відрізнити сигнал модуляції котушки від інших сигналів, для цього треба використати фільтр нижніх частот. Фільтр нижніх частот проєктують із наступних міркувань: для того, щоб сигнал, який пропорційний до магнітного поля котушки, можна було відрізнити від шуму, то відношення сигнал-шум має становити щонайменше 6дБ.

Максимальна частота зрізу ФНЧ має бути:

$$f_{\max BW} = \left( \frac{\Delta V}{SNR \times V_{noise}} \right)^2, \quad (4.5)$$

де  $\Delta V$  – зміна в напрузі Холла, на яку система має реагувати,  $SNR$  – відношення сигнал-шум,  $V_{noise}$  – еквівалентний вхідний шум.

Напруга Холла, пропорційна до поля котушки, буде рівна 60.5мкВ. Задачею роботи є розробка схеми компенсації, яка буде забезпечувати таку точність, при якій значення зміни чутливості впродовж тривалої експлуатації не перевищуватиме 1%. Для цього візьмемо вимогу із запасом, так щоб система реагувала на зміни в 0.1%. Отже:

$$\Delta V = 60.5 \mu V \times 0.001 = 60.5 \text{ нВ}. \quad (4.5)$$

З симуляцій шуму, було знайдено що еквівалентний вхідний шум рівний  $15 \text{ нВ} / \sqrt{G_u}$ . Таким чином максимальна частота зрізу ФНЧ буде:

$$f_{\max BW} = \left( \frac{60.5 \text{ нВ}}{2 \times 15 \text{ нВ} / \sqrt{G_u}} \right)^2 = 4 G_u. \quad (4.5)$$

В ролі фільтра можна було б використати RC фільтр. Але для отримання малої частоти зрізи необхідно використовувати великі опори або великі ємності. Обидва варіанти є не підходящими, якщо на меті є створення повністю інтегрованої системи, оскільки вони вимагають великої площі на кристалі.

В якості фільтра розробимо систему, яка була запропонована в [40, с.1523].

На рис. 4.5. показано функціональну блок-схему ФНЧ.

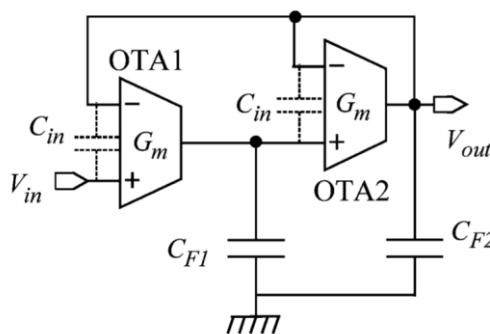


Рис. 4.5. Функціональна блок-схема ФНЧ

Фільтр побудовано за архітектурою Gm-C. Цей клас фільтрів має значні переваги за рахунок можливості налаштування та простоти топології. Такий

фільтр не вимагає великих конденсаторів на кристалі за рахунок використання підсилювачів крутизни з дуже малою крутизною.

Для такого Gm-C фільтра використовується підсилювач крутизни до складу якого входить підсилювач з трьома входами. Головним призначенням підсилювача з трьома входами є підтримання напруги стік-витік вхідних транзисторів M1 та M2 сталою, так щоб транзистори працювали в тріодному режимі. На рис. 4.6. зображено схему підсилювача крутизни

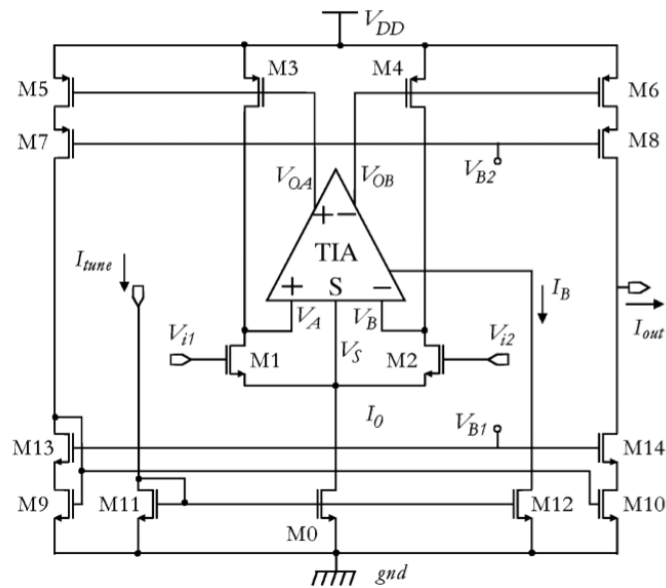


Рис. 4.6. Схема підсилювача крутизни для ФНЧ

На рис. 4.7. представлено схему підсилювача з трьома входами.

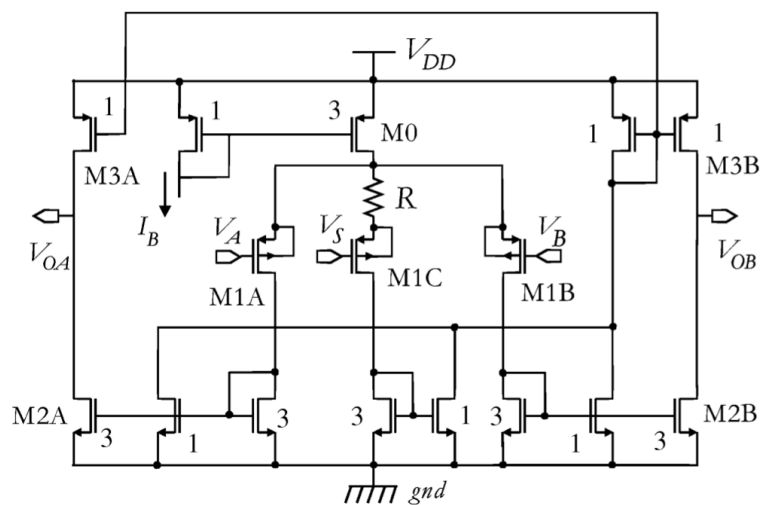




Рис. 4.7. Схема підсилювача з трьома входами для ФНЧ

Даний фільтр можна налаштувати на різні частоти зрізу. Частота зрізу фільтра залежить від струму зміщення фільтра: при зменшенні струму частота зменшиться. Фільтр найкраще працює в межах від 1.5Гц до 15Гц. На рис. 4.8. надано АЧХ та ФЧХ для різних струмів зміщення.

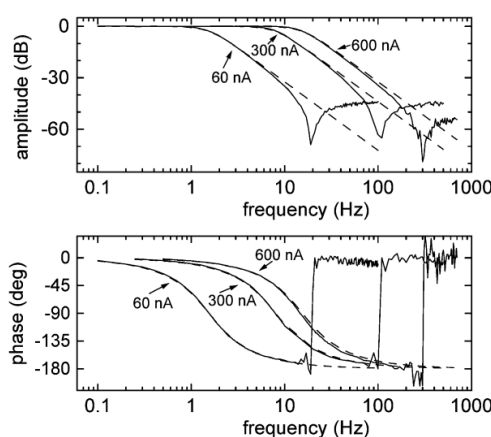


Рис. 4.8. АЧХ та ФЧХ фільтра при різних струмах зміщення

Отже, при струмі зміщення 60нА, фільтр буде працювати в бажаному діапазоні частот, що забезпечить можливість системи реагувати на зміни чутливості і компенсувати їх забезпечуючи виконання умови того, щоб чутливість не змінювалася більш ніж на 1%.

Оскільки цей Gm-C фільтр спроектований так, що на його вхід має подаватися несиметрична напруга, то необхідно створити перетворювач диференційної вихідної напруги аналогового фронт-енду в несиметричну напругу. На рис. 4.9 зображено схему такого перетворювача.

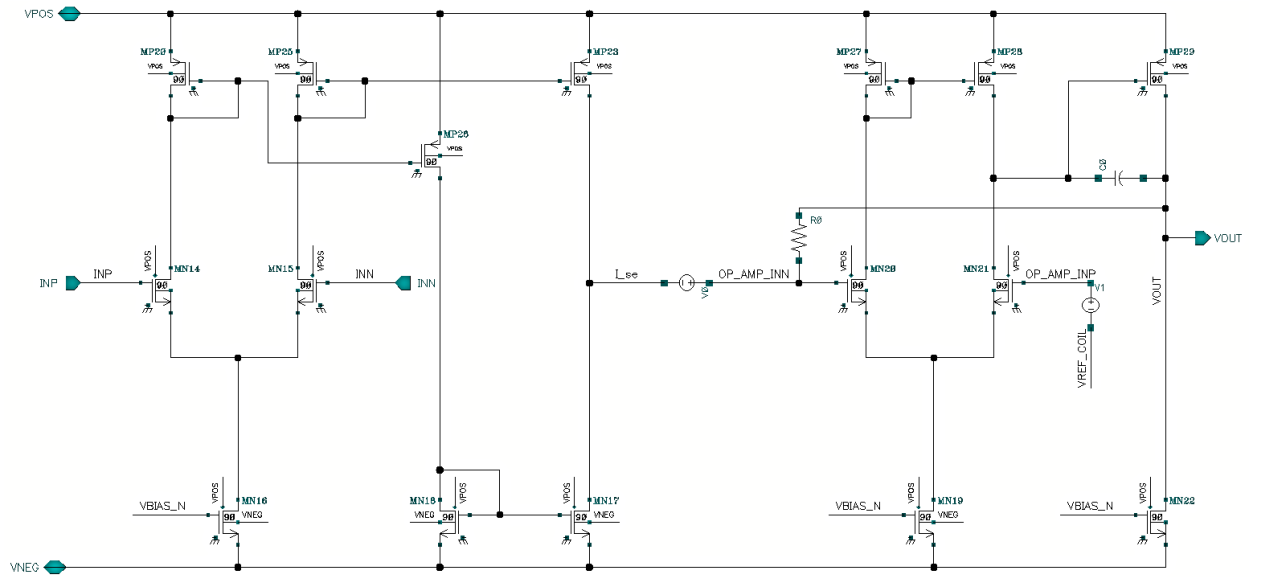


Рис. 4.9. Перетворювач диференційної напруги в несиметричну

Перетворювач працює наступним чином: диференційна напруга приходить на вхід диференційної пари, внаслідок чого виникає диференційний струм у двох вітках. Далі струм в цих вітках перетворюється, копіюється таким чином, щоб потім відняти одну половину диференційного струму від іншої, в результаті чого утворюється несиметричний струм, пропорційний до вхідної диференційної напруги. Далі цей струм перетворюється в несиметричну напругу.

$$V_{OUT} = V_{IND} g_{m0} R + V_{REF\_COIL} , \quad (4.6)$$

де  $V_{IND}$  – вхідна диференційна напруга,  $g_{m0}$  – крутизна вхідної диференційної пари,  $R$  – опір в ланці зворотного зв'язку транс резистивного підсилювача,  $V_{REF\_COIL}$  – опорне джерело напруги.

Отримана напруги буде подаватися на один із входів підсилювача похибки. На інший вхід буде подаватися опорна напруга. Враховуючи те, що поле котушки буде змінювати свою полярність періодично, для того щоб можна було відрізнити магнітне поле котушки від зовнішнього магнітного поля, то опорна напруга на вході підсилювача похибка має також бути змінною. Схема джерела опорної напруги працює таким чином, що воно змінює значення опорної напруги в залежності від фази протікання струму в котушці. На рис. 4.10. зображено схему такого джерела напруги.

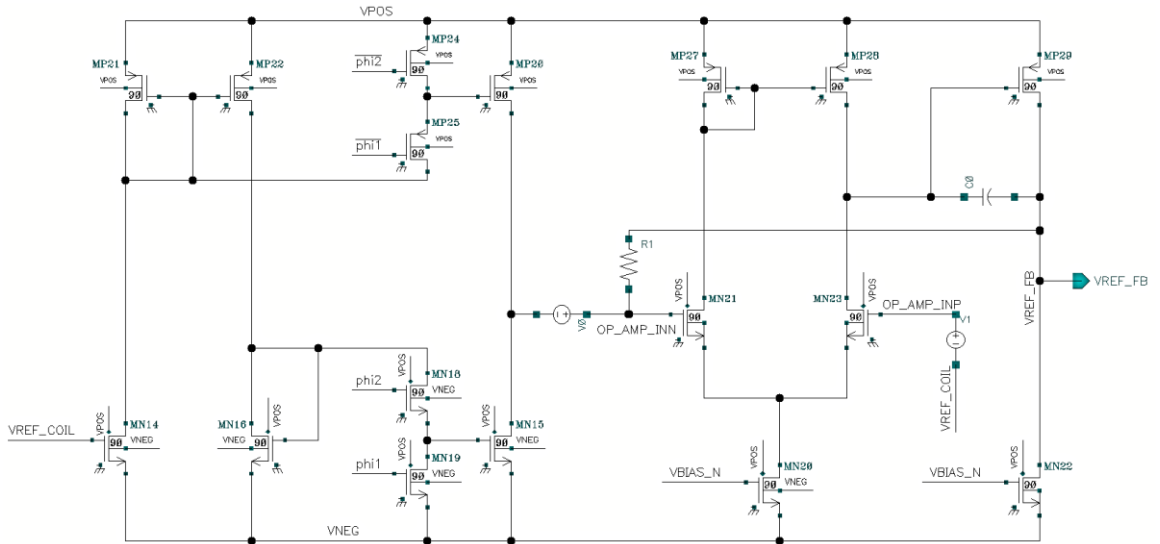


Рис. 4.10. Джерело опорної напруги для ланки зворотного зв'язку

Це джерело опорної напруги використовує перетворювач струму в напругу такий самий як і для попереднього перетворювача. Для того, щоб сигнал змінювався, до струмових дзеркал було додано ключі. В різних фазах, струм через резистор в ланці зворотного зв'язку протікатиме в протилежних напрямках. Вихідна напруга буде рівною:

$$V_{REF\_FB} = V_{REF\_COIL} g_{m1} R_1 + V_{REF\_COIL}, \quad (4.6)$$

де  $g_{m1}$  – крутизна вхідної диференційної пари.

Спроекуємо схему так, щоб  $g_{m0} = g_{m1}$ . Підсилювач похибки буде працювати так, що напруга на його входах буде рівною, а отже:

$$V_{IND} R_0 = V_{REF\_COIL} R_1. \quad (4.7)$$

Оскільки опорна напруга котушки дорівнює 1.8В, а диференційна напруга сигналу при генеруванні котушкою поля 11Гаусс і при номінальних значеннях коефіцієнтів підсилення цього сигналу складає 5.625мВ, то:

$$\frac{R_0}{R_1} = \frac{1.8}{0.005625} = 320. \quad (4.8)$$

За таких умов виберемо:

$$R_0 = 320 \text{кОм}, \quad (4.9)$$

$$R_1 = 1\text{кОм}. \quad (4.10)$$

На рис.4.11. зображено схему підсилювача похибки.

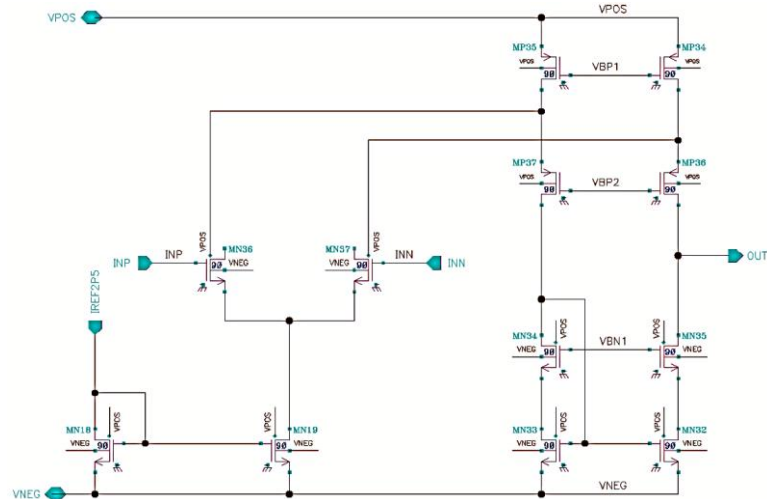


Рис. 4.11. Підсилювач помилки

Підсилювач похибки спроектовано за архітектурою фолдед-каскада. Після підсилювача похибки сигнал буде надходити до драйвера елемента Холла, де він буде впливати на струм зміщення. На рис. 4.12. показано нову змінену схему драйвера струму елемента Холла.

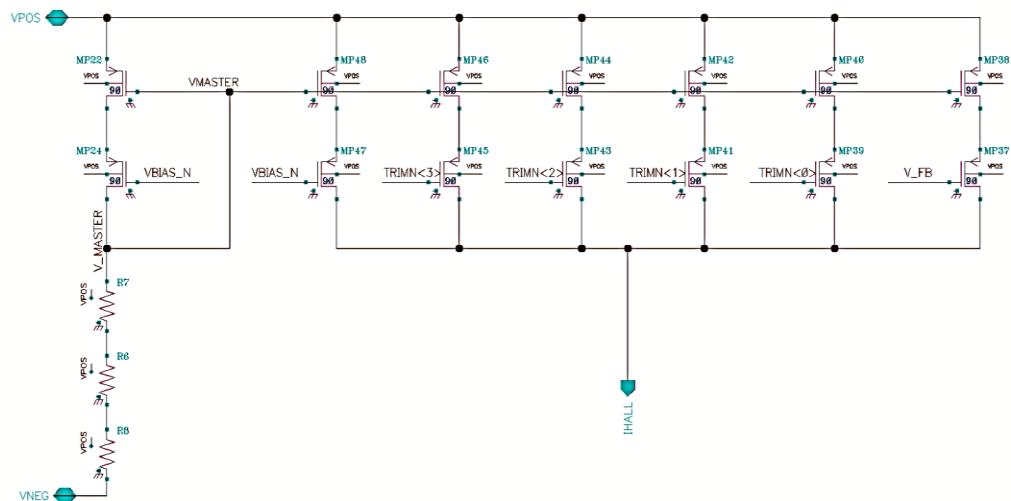


Рис. 4.12. Новий драйвер струму

По-перше, було додано додаткові транзистори і ключі, за допомогою яких можна тримувати значення струму зміщення. По-друге, було додано транзистор

на затвор, якого буде надходити напруга з підсилювача похибки. Таким чином, якщо, наприклад, внаслідок дії напруження чутливість елемента Холла збільшиться, то зворотній зв'язок відпрацює так, що напруга на виході підсилювача похибки зросте, що призведе до зменшення струму зміщення, а отже і до компенсації дії напруження.

#### **4.3. Аналіз характеристик інтегральних сенсорів струму з компенсацією дії напруження**

На рис. 4.13. зображено як буде виглядати напруга на виході елемента Холла при включеній котушці.

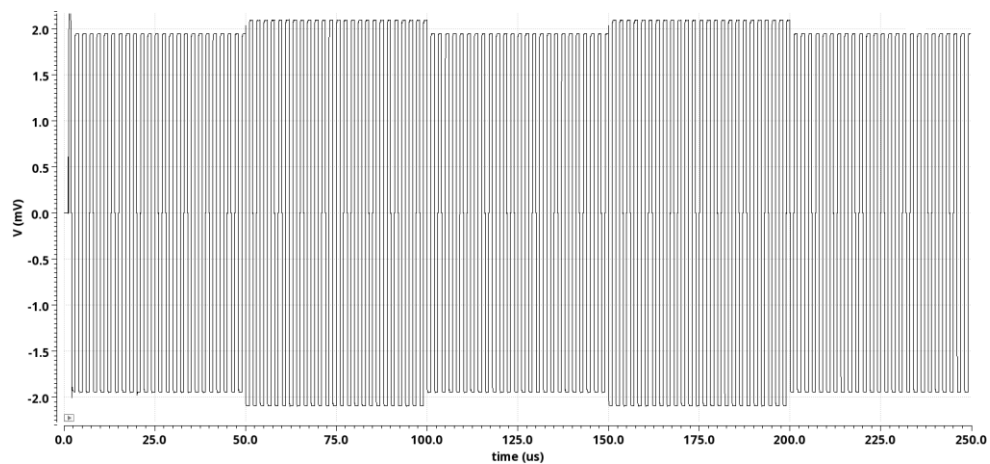


Рис. 4.13. Вихід елемента Холла при включеній котушці

На рис. 4.14. показано як буде виглядати сигнал на виході аналогової частини після проходження сигналу через аналоговий фронт-енд.

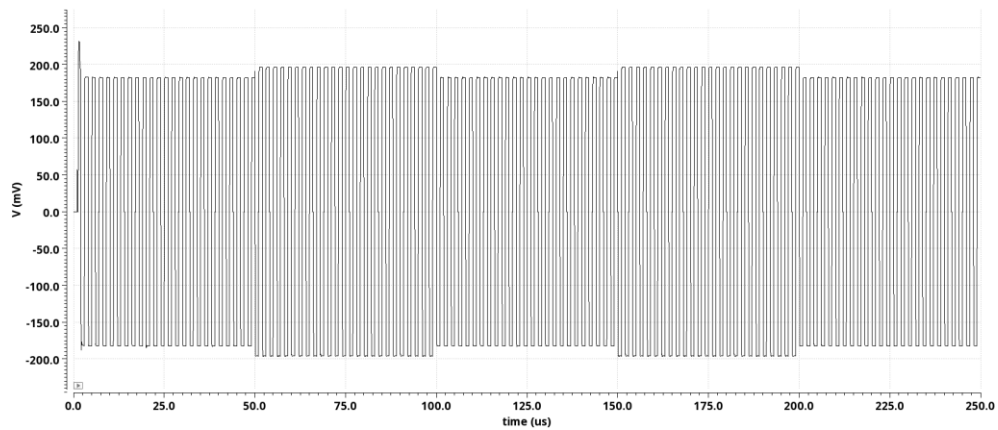


Рис. 4.14. Вихід аналогової частини при включеній котушці

Для аналізу того, як працює схема компенсації дії напруження необхідно провести симуляції, в яких буде видно як система реагує на збудження. Для цього чутливість елемента Холла різко зміниться, під час того як схема компенсації буде включена.

Реакція на різку велику зміну чутливості є показовою симуляцією. В реальності впродовж експлуатації різкі зміни чутливості елемента Холла є малоймовірними, а отже якщо система відпрацює нормально в найгірших умовах, то можна вважати, що система в цілому працює нормально.

Збільшимо чутливість елемента Холла на 15%. На рис. 4.15. зображено графік зміни чутливості.

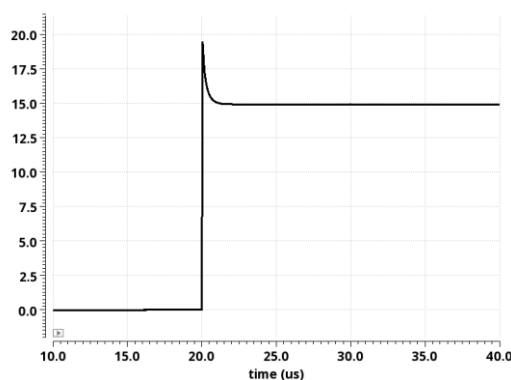


Рис. 4.15. Зміна чутливості, якби компенсація була вимкнена

На рис. 4.16. зображено сигнал на виході підсилювача помилки.

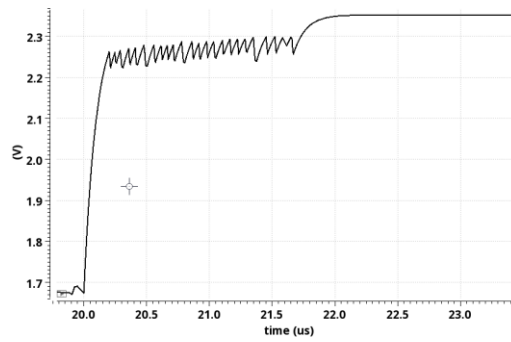


Рис. 4.16. Сигнал на виході підсилювача помилки при різкій зміні чутливості

На рис. 4.17. показано як така реакція схеми компенсації призведе до зменшення чутливості елемента Холла.

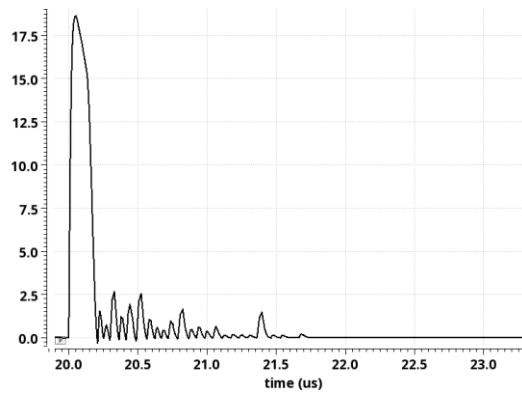


Рис. 4.17. Зміна чутливості при включеній компенсації



Оскільки випадок раптової зміни є найгіршим для схеми зворотного зв'язку. Тому для цього випадку буде проведено корнер симуляції в температурному діапазоні від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $175^{\circ}\text{C}$ . На рис. 4.18. зображено результати цих симуляцій.

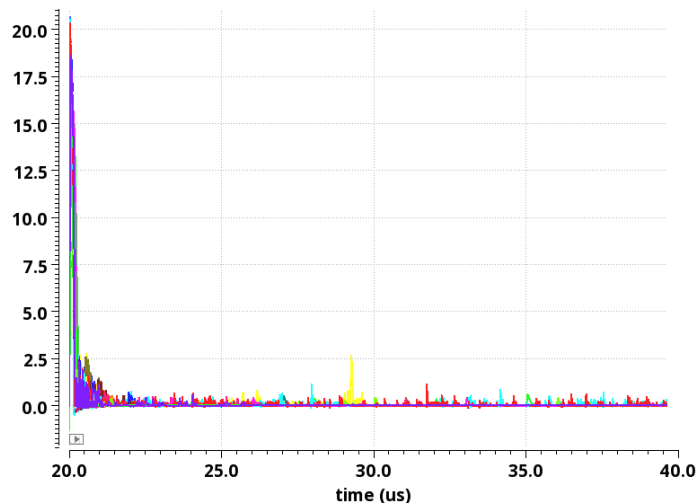


Рис. 4.18. Зміна чутливості при включеній компенсації

З цих результатів видно, що запропонована система буде працювати в широкому температурному діапазоні і зможе за менше ніж 20мкс відновити чутливість. При цьому зміни значення чутливості не перевищують 1%.

### Висновки до четвертого розділу

Отже, було досліджено існуючі способи компенсації дії напруження в інтегральних сенсорах струму на ефекті Холла. Було визначено, що використання інтегральної котушки індуктивності для магнітної компенсації в аналоговій частині має ряд переваг порівнюючи з іншими способами: вона є простою, вона не потребує додаткових елементів, для неї непотрібно проводити додаткові обчислення для калібрування, а також її можна зробити температурно незалежною.

Було розраховано і спроектовано схему компенсації дії напруження для інтегрального сенсора струму на ефекті Холла, яка використовує інтегровану котушку індуктивності. Для котушки індуктивності було спроектовано драйвер, для того, щоб пропускати через неї струм в різних напрямках. Для реалізації схеми компенсації було розроблено перетворювач диференційної напруги в постійну, фільтр нижніх частот для демодуляції сигналу, джерело опорної напруги для підсилювача похибки, яке перемикається синхронно з перемиканням котушки, підсилювач похибки, а також було модернізовано драйвер елемента Холла, для того щоб було можливо здійснювати керування. В Додатку А представлено функціональну блок-схему аналоговий частини сенсора. Було проведено часові симуляції сенсора Холла разом з ввімкненою схемою компенсації. Із результатів видно, що така схема компенсації задовольняє вимогам специфікацій і може забезпечити незмінність чутливості в межах 1% впродовж довготривалої експлуатації.

Незважаючи на задовільні результати симуляцій, необхідно провести досліді в реальних умовах, для чого треба виготовити сенсор струму на кремнії і проводити додаткові дослідження в лабораторних умовах.

## 5 РОЗРОБКА СТВРТАП-ПРОЄКТУ

### 5.1. Опис ідеї технології

В табл. 5.1. наведено опис ідеї стартап-проекту.

Таблиця 5.1.

Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Технологія компенсації дії напруження для напівпровідникових інтегральних сенсорів на ефекті Холла	Виробництво напівпровідникових приладів і пристроїв	Рішення, яке користувач може застосувати в будь-якому технологічному процесі виготовлення. Продукти, які використовуватимуть це рішення зможуть працювати ефективніше впродовж тривалої експлуатації

В табл. 5.2. визначаються характеристики ідеї проекту.

Таблиця 5.2.

Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(Потенційні) концепції конкурентів			W	N	S
		Мій проєкт	Конкурент 1	Конкурент 2			
1.	Вартість	низька	середня	висока			+
2.	Можливість застосувати в будь-якому технологічному процесі	наявна	відсутня	відсутня			+
3.	Довготривала технічна підтримка	наявна	наявна	відсутня		+	

## 5.2. Технологічний аудит ідеї проєкту

В табл. 5.3. описано технологічну здійсненність ідеї проєкту.

Таблиця 5.3.

Технологічна здійсненність ідеї проєкту

№ п/п	Ідея проєкту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Проектні роботи	Створення документації	Наявна	Доступна
2.	Схемотехнічні роботи	Проектування схеми компенсації, враховуючи специфіку пристрою	Наявна	Доступна
3.	Створення програмного забезпечення	Наявність відповідного апаратного та програм-ного забезпечення	Наявна	Доступна
4.	Тестування та верифікація	Вимірювальне обладнання, тест-інженер	Відсутня	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проєкту: можливо реалізувати ідею, за умови відшукування реального виконавця п.2–4				

## 5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

В табл. 5.4. представлено попередню характеристики потенційного ринку стартап-проєкту.

Таблиця 5.4.

Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проєкту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1.	Кількість головних гравців, од	5
2.	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	500 000
3.	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стагнує
4.	Наявність обмежень для входу	Немає
5.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	В залежності від специфікації замовника
6.	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	30 %
Ринок є рентабельним оскільки, кількість головних гравців мала, що у свою чергу свідчить про низьку конкуренцію та високу рентабельність		

В табл. 5.5. наведено характеристику потенційних клієнтів стартап-проєкту.

Таблиця 5.5.

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних цільових груп	Вимоги споживачів до товару
1.	Збільшення надійності і точності роботи сенсорів	Виробники мікросхем спеціального призначення, виробники мікросхем загального призначення	Виробники мікросхем спеціального призначення мають різні вимоги	Енерго-ефективність, робота в великому діапазоні температур

В табл. 5.6. проаналізовано фактори загроз.

Таблиця 5.6.

Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Конкуренти – відомі компанії	Збільшення реклами
2.	Зміна стандартів	Технологія може не пройти нові стандарти	Освоєння інженерами нових стандартів
3.	Якісний	Несумісність технологій з технологічними процесами замовника	Адаптація технології

В табл. 5.7. проаналізовано фактори можливостей.

Таблиця 5.7.

Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Зростання попиту	Низька ціна спричиняє зацікавленість до технології	Найм нових працівників
2.	Участь у виставках	Можливість демонстрації технології потенційним клієнтам	Відправляти спеціалістів на виставки

В табл. 5.8. наведено результати ступеневого аналізу конкуренції на ринку.

Таблиця 5.8.

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
Тип конкуренції: чиста	Мала кількість гравців на ринку	Покращувати технологію, збільшуючи її надійність
За рівнем конкурентної боротьби: міжнародний	Конкуренти та замовник знаходяться в інших державах	Вихід на міжнародний ринок
За галузевою ознакою: внутрішньогалузева	Конкуренти працюють в одній галузі	Слідкувати за інноваціями конкурентів
Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Конкуренти пропонують технологію, що задовольняють одну і ту ж потребу	Покращення якості продукції
За характером конкурентних переваг: нецінова	Основними характеристиками є якість та надійність	Покращувати технологію
За інтенсивністю: не марочна	Роль бренду не має значення	Відсутня потреба у рекламі марки

В табл. 5.9. наведено аналіз конкуренції в галузі за М. Портером.

Таблиця 5.9.

Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Motorola Sandisk AMD	Науково-дослідні роботи; інтелектуальна власність;	Постачальники ПЗ є незаміними	Контроль якості	Нові технологічні процеси
Висновки:	Середня інтенсивність конкурентної боротьби	Є можливості для входу. Є конкуренти.	Постачальники ПЗ не диктують умови роботи	Клієнтам необхідне підвищення надійності	Відсутні обмеження

Існує можливість для виходу на ринок за даної конкуренції. Для цього потрібно забезпечити високу якість та надійність технології і проводити дослідні роботи для покращення конкурентної ситуації.

В табл. 5.10. приведено обґрунтування факторів конкурентоспроможності.

Таблиця 5.10.

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
1.	Собівартість	Низька собівартість
2.	Надійність	Більша надійність ніж у конкурентів
3.	Адаптивність	Технологія може працювати з різними технологічними процесами

В табл. 5.11. зображено порівняльний аналіз сильних та слабких сторін стартап-проєкту.

Таблиця 5.11.

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін стартап-проєкту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1.	Собівартість	15	+						
2.	Надійність	18				+			
3.	Адаптивність	20	+						

В табл. 5.12. представлено SWOT-аналіз стартап-проєкту

Таблиця 5.12.

SWOT-аналіз стартап-проєкту

Сильні сторони: порівняно низька вартість, надійність, адаптивність	Слабкі сторони: проведення вдосконалення якості
Можливості: збільшення попиту	Загрози: нові інноваційні технологічні відкриття

В табл. 5.13. представлено альтернативи ринкового впровадження проєкту.

Таблиця 5.13.

Альтернативи ринкового впровадження стартап-проєкту

№ п/п	Альтернатива ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Об'єднання з іншими компаніями	0,2	2 роки
2.	Робота з індивідуальними вимогами замовника	0,9	6 місяців
3.	Зниження затрат на виробництво	0,6	1 роки

Оскільки технологія не є широкого вживаною, то буде обрано другу альтернативу.

#### 5.4. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

В табл. 5.14. наведено вибір цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 5.14.

Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу в сегмент
1.	Виробники мікросхем спеціального призначення	+	високий	висока	середня
2.	Виробники мікросхем загального призначення	+	середній	висока	низька

В результаті обидві групи клієнтів вибрані як цільові групи.



На основі обраних груп клієнтів визначаємо стратегію диференційованого маркетингу.

В табл. 5.15. зображено процедуру визначення базової стратегії розвитку

Таблиця 5.15.

Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкуренто- спроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1.	Робота з індивідуальними вимогами замовника	Диференційований маркетинг	Своєчасне задоволення індивідуальних вимог замовника	Стратегія диференціації

В табл. 5.16. зображено процедуру визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Таблиця 5.16.

Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1.	Ні	Шукати нових та забирати існуючих	Не буде	Виклик лідера

В табл. 5.17. зображено процедуру визначення стратегії позиціонування

Таблиця 5.17.

Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкуренто- спроможні позиції власного стартап-	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту
----------	--	------------------------------	--	--

			проєкту	
1.	Довготривалі ефективність та надійність	Стратегія диференціації	Задоволення індивідуальних вимог замовника за ціною нижчою, ніж у конкурентів	Індивідуальний підхід, надійність

### 5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту

В табл. 5.18. зображено процедуру визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Таблиця 5.18.

Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу в сегмент
1.	Виробники мікросхем спеціального призначення	+	високий	висока	середня
2.	Виробники мікросхем загального призначення	+	середній	висока	низька

В табл. 5.19. описано три рівні моделі товару

Таблиця 5.19.

Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні послуги	Сутність та складові		
1. Товар за задумом	Технологія компенсації дії напруження		
2. Товар у реальному виконанні	Властивості/ характеристики		М/Нм
	1. Енергоефективність		Вр/Тх/Тл/Е/Ор
	2. Надійність		М
	3. Адаптивність		Тх
	Якість: відповідно до ISO 26262		
	Пакування: файли з інформацією, технічна документація		

	Марка: «StressComp»
3. Товар із підкріпленням	Сертифікат відповідності
	Сервісне обслуговування
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патенти на технологію.	

В табл. 5.20. наведено визначення меж встановлення цін

Таблиця 5.20.

Визначення меж встановлення цін

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на послугу
1.	\$30000–60000	\$25000–60000 /шт.	\$1М-500М/рік.	\$20000–25000

В табл. 5.21. представлено формування системи збуту

Таблиця 5.21.

Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Продаж	Реалізація технологічного рішення в технологічному процесі замовника за узгодженою специфікацією	Напрямку	Напрямку

В табл. 5.22. запропоновано концепцію маркетингових комунікацій

Таблиця 5.22.

Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
-------	---------------------------------------	--	--	----------------------------------	--------------------------------

1.	Шукають нові рішення, які можуть довгий час залишатися актуальними	Конференції, міжнародні виставки і презентації, через особистих спеціалістів	Надійність, адаптивність, енергоефективність	Показати можливості технології	Демонстрація результатів використання технології
----	--	--	--	--------------------------------	--

### **Висновки до п'ятого розділу**

Рішення, які були отримані в ході роботи за темою магістерської дисертації, можна застосовувати для багатьох інших проєктів. У зв'язку з цим розроблено стартап-проєкт, який просуває технологію компенсації дії напруження.

У таблицях 5.1–5.22 наведено особливості стартап-проєкту, з яких можна зробити наступні висновки:

- Ринок є рентабельним, тому комерціалізація проєкту є можливою.
- Проблем входження майже немає, а стан конкуренції не створює проблем для входження на ринок.
- Проєкт є конкурентоспроможним.
- Цільовою аудиторією є виробники мікросхем спеціального та загального призначення.
- Подальша імплементація проєкту є доцільною.

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДЦІЇ

У роботі було проаналізовано принципи роботи такі сенсорів і методів вимірювання струму як котушка Роговського, трансформатор струму, вимірювання через шунт, вимірювання через опір дроселя та сенсори на ефекті Холла. Було проведено їх порівняння і визначено їх головні переваги і недоліки. Серед всіх цих сенсорів особливу увагу було приділено дослідженню сенсорів струму на ефекті Холла, які мають наступні переваги порівняно з іншими: вони можуть бути виготовлені як одна цілісна система в одному чипі разом з додатковими підсилювачами, перетворювачами та цифровою частиною керування та обробки вимірюного сигналу; виготовлений чип є компактним; вони дешево коштують; можуть вимірювати струм як з використанням магнітного осердя так і без нього; за потреби їх можна програмно налаштовувати. Серед головних недоліків такого класу сенсорів струму є температурна залежність їх компонентів і вони все ще потребують вдосконалення.

Було досліджено фізичні основи роботи напівпровідникових сенсорів струму на ефекті Холла. Для елементів Холла, які використовуються в сенсорах, характерною рисою є наявність напруги зсуву. Якщо його ніяк не компенсувати, то сенсор буде міряти струм з недопустимою помилкою. Напруга зсуву в елементах Холла може виникати внаслідок впливу різних зовнішніх факторів, як наприклад температура, рівень вологості; внаслідок розбіжності геометричних розмірів; внаслідок наявності поверхневих зарядів; внаслідок технологічних процесів виготовлення інтегральних мікросхем. Для компенсації напруги зсуву використовують різні способи динамічної компенсації. Серед таких способів є методи просторового та часового усереднення.

Також у роботі досліджувалося явище напруження та його впливу на інтегральні сенсори струму на ефекті Холла. Зазвичай напруження в інтегральних мікросхем може виникати в ході процесів виробництва:

фабрикації та корпусування. Під час фабрикації мікросхем матеріали з різними властивостями мають взаємодіяти один з одним. Різниця коефіцієнтів термічного розширення кремнію та інших матеріалів є основною причиною виникнення термомеханічного напруження. Також напруження виникає під час довготривалої експлуатації мікросхеми. Причиною цього є зміна рівню вологості навколишнього середовища, температури та інших зовнішніх факторів. Було показано, що високий рівень вологості призводить до виникнення напруження, що в свою чергу призводить до зміни чутливості. Це пов'язано з тим, що корпусу інтегральних сенсорів струму зазвичай негерметичні і вони здатні поглинати вологу. При більших температурах навколишнього середовища швидкість зміни чутливості збільшується. Процес поглинання вологи є оборотнім процесом, що означає, що чутливість може самостійно повернутися до попереднього значення чутливості, якщо рівень вологості зменшиться. Швидкість поглинання вологи пластиковим корпусом є детермінованим та повторюваним явищем.

Напруження в інтегральних мікросхемах призводить до виникнення п'єзореzystивного ефекту, п'єзо-Холл ефекту. Внаслідок п'єзореzystивного ефекту змінюється опір матеріалів, а внаслідок п'єзо-Холл ефекту змінюється коефіцієнт Холла. В результаті цих явищ чутливість елемента Холла змінюється, що може бути недопустимо для цілого ряду застосувань.

У роботі було досліджено можливі способи компенсації дії напруження на інтегральні сенсори струму на ефекті Холла. Розглядалися такі способи як компенсація за допомогою п'єзореzystора, компенсація у цифровій частині на основі калібрувальних вимірювань з інтегрованої котушки індуктивності, компенсація виключно у аналоговій частині, яка використовує магнітне з інтегрованої котушки індуктивності як опорний сигнал. Можливою є компенсація, яка використовує явище п'єзореzystивного ефекту. Недоліком використання п'єзореzystора є залежність його опору не тільки від напруження, але і від інших параметрів. Для врахування температури необхідно розробляти

сенсор температури, який буде потребувати додаткових схемотехнічних елементів і додаткової обробки у цифровій частині. Компенсація, яка реалізується цифровій частині на основі вимірних даних з опорної інтегрованої котушки індуктивності, потребує додаткового аналогового фронт-енду, додаткового АЦП та інших складних схемотехнічних рішень для кращої точності роботи. Кращі результати можна отримати, використовуючи магнітну компенсацію з інтегральної котушки індуктивності виключно в аналоговій частині.

Таким чином було спроектовано аналогову частину інтегрального сенсора струму на ефекті Холла з компенсацією дії напруження з допомогою використання інтегрованої котушки індуктивності виключно в аналоговій частині. Головними компонентами сенсора є елемент Холла разом з драйвером струму для нього, аналоговий фронт-енд для підсилення сигналу з елемента Холла, котушки індуктивності, драйвера струму для котушки, схеми компенсації дії напруження а також опорного джерела напруги та струму. Драйвер елемента Холла використовує набір ключів, які потребують контролюючих сигналів для комутації, за допомогою перемикання яких здійснюється динамічна компенсація напруги зсуву. До складу аналогового фронт-енду входять два підсилювача, включені послідовно один з одним. Перший з підсилювачів – підсилювач крутизни, другий – трансрезистивний підсилювач. Драйвер струму котушки також має набір ключів, яке забезпечують роботу в чотирьох режимах: котушка вимкнена, котушка в режимі очікування, струм через котушку протікає в прямому напрямі, струм через котушку протікає в зворотному напрямі.

Схема компенсації складається з декількох елементів: перетворювач диференційної напруги з виходу аналогового фронт-енду у несиметричну напругу; амплітудного демодулятора, який являє собою фільтр нижніх частот з дуже малою частотою зрізу; підсилювача помилки; джерела опорної напруги

для підсилювача похибки, який працює синхронно з режимами роботи драйвера котушки.

Для всіх компонентів сенсора струму було проведено корнер та Монте-Карло симуляції в діапазоні температур від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $175^{\circ}\text{C}$  та в діапазоні напруги живлення від 2.8В до 3.6В. Для всіх зворотних зв'язків було проведено симуляції, які проводять аналіз стабільності. Також було проведено симуляції в часі, на яких спостерігалася реакція сенсора на різку зміну чутливості. В результаті було отримано систему, яка забезпечує незмінність чутливості в межах 1% впродовж довготривалої експлуатації.

Розроблений сенсор струм потребує подальшого вдосконалення. По-перше, незважаючи на задовільні результати симуляцій, опорне джерело струму драйвера є в значній мірі залежним від напруження і в меншій мірі залежним від температури. Тому опорне джерело струму драйвера потребує подальшої модернізації, яка б враховувала ефекти дії напруження на нього. По-друге, далі необхідно забезпечити сенсор цифровою частиною, яка б відігравала роль системи керування для сенсора, а також передавала б виміряні значення струму назовні. Для подальших дослідження необхідно виготовити прототип спроектованого сенсора на кремнії і продовжити аналіз його характеристик в реальних та в лабораторних умовах. Саме такі експерименти зможуть дати більш повну інформацію про ефективність спроектованого сенсора з схемою компенсації дії напруження.

Результати роботи можуть бути використані не лише для сенсорів струму на ефекті Холла, але і для інших інтегральних схем, які використовують елементи Холла для своєї роботи, наприклад для сенсорів відстеження об'єктів у просторі, для сенсорів вимірювання швидкості та напрямку обертання двигуна, для пристроїв безконтактного перемикавання.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Costa, F., et al. "The current sensors in power electronics, a review." EPE Journal 11.1 (2001): 7-18.
2. Easwaran, Sri Navaneethakrishnan. "Low-Side Current Regulation and Energy Limitation." Current Sensing Techniques and Biasing Methods for Smart Power Drivers. Springer, Cham, 2018. 73-91.
3. Xiao, Chucheng, et al. "An overview of integratable current sensor technologies." 38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 2003. Vol. 2. IEEE, 2003.
4. Razavi, Behzad. Design of analog CMOS integrated circuits. Tata McGraw-Hill Education, 2002.
5. Easwaran, Sri Navaneethakrishnan. "High-Side Current Regulation and Energy Limitation." Current Sensing Techniques and Biasing Methods for Smart Power Drivers. Springer, Cham, 2018. 43-71.
6. Korchaka, M. Розробка нового підходу проектування інтегральних сенсорів струму / Mykola Korchaka // Електронна та Акустична Інженерія. – 2020. – Т. 3, N 2. - С. 16 - 19. – Режим доступу : DOI: 10.20535/2617-0965.2020.3.2.198602.
7. Hall, Edwin H. "On a new action of the magnet on electric currents." American Journal of Mathematics 2.3 (1879): 287-292.
8. Popovic, Radivoje S. Hall effect devices. CRC Press, 2003.
9. Versnel, W. "Analysis of symmetrical Hall plates with finite contacts." Journal of Applied Physics 52.7 (1981): 4659-4666.
10. Versnel, W. "Analysis of a circular Hall plate with equal finite contacts." Solid-State Electronics 24.1 (1981): 63-68.
11. Wolf, Helmut F. Silicon semiconductor data. Vol. 9. Pergamon, 1969.
12. Munter, P. J. A. "A low-offset spinning-current Hall plate." Sensors and Actuators A: Physical 22.1-3 (1990): 743-746.

13. Bilotti, Alberto, Gerardo Monreal, and Ravi Vig. "Monolithic magnetic Hall sensor using dynamic quadrature offset cancellation." *IEEE journal of solid-state circuits* 32.6 (1997): 829-836.
14. Steiner, R., et al. "Offset reduction in Hall devices by continuous spinning current method." *Sensors and Actuators A: Physical* 66.1-3 (1998): 167-172.
15. Udo, Ausserlechner. "Limits of offset cancellation by the principle of spinning current Hall probe." *SENSORS, 2004 IEEE*. IEEE, 2004.
16. Patterson, James Deane, and Bernard C. Bailey. *Solid-state physics: introduction to the theory*. Springer Science & Business Media, 2007.
17. Timoshenko, Stephen. *History of strength of materials: with a brief account of the history of theory of elasticity and theory of structures*. Courier Corporation, 1983.
18. Manic, Dragan. *Drift in silicon integrated sensors and circuits due to thermo-mechanical stresses*. No. THESIS. EPFL, 2000.
19. Hu, S. M. "Stress- related problems in silicon technology." *Journal of applied physics* 70.6 (1991): R53-R80.
20. Manic, D. *Instability of silicon integrated sensors and circuits caused by thermo-mechanical stress*. Diss. PhD Thesis, Swiss Federal Institute of Technology EPFL, Switzerland, 2000.
21. Lau, John, ed. *Thermal stress and strain in microelectronics packaging*. Springer Science & Business Media, 2012.
22. Slattery, O. F., G. Kelly, and J. Greer. "Thermal and mechanical problems in microelectronics." *Benefiting from Thermal and Mechanical Simulation in Micro-Electronics*. Springer, Boston, MA, 2000. 17-26.
23. Shi, J. Z., et al. "A novel high performance die attach for ceramic packages." *J. Electron. Packag.* 122.2 (2000): 168-171.
24. Hibbeler, Russell C. *"Mechanics of materials."* Prentice Hall International, Inc (1997).

- 25.** Van Gestel, Henricus Cornelis Josephus Maria. "Reliability Related Research on Plastic IC-Packages: A Test Chip Approach: A Research in the Development of Silicon Test Dies for Measurement and Comparison of Molded IC-Package Reliability." (1994).
- 26.** Miura, Hideo, et al. "Thermal stress measurement in silicon chips encapsulated in IC plastic packages under temperature cycling." (1993): 9-15.
- 27.** Tummala, Rao, Eugene J. Rymaszewski, and Alan G. Klopfenstein. *Microelectronics Packaging Handbook: Subsystem Packaging*. Springer Science & Business Media, 1997.
- 28.** Stellrecht, Eric, Bongtae Han, and Michael G. Pecht. "Characterization of hygroscopic swelling behavior of mold compounds and plastic packages." *IEEE Transactions on components and Packaging Technologies* 27.3 (2004): 499-506.
- 29.** Manic, D., J. Petr, and R. S. Popovic. "Short and long-term stability problems of Hall plates in plastic packages." 2000 IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings. 38th Annual (Cat. No. 00CH37059). IEEE, 2000.
- 30.** Ausserlechner, U., M. Motz, and M. Holliker. "Drift of magnetic sensitivity of smart Hall sensors due to moisture absorbed by the IC-package [automotive applications]." *SENSORS*, 2004 IEEE. IEEE, 2004.
- 31.** Cesaretti, Juan Manuel, et al. "Effect of stress due to plastic package moisture absorption in Hall sensors." *IEEE Transactions on Magnetics* 45.10 (2009): 4482-4485.
- 32.** Heuberger, Anton, ed. *Mikromechanik: Mikrofertigung mit Methoden der Halbleitertechnologie*. Springer, 1991.
- 33.** Kanda, Yozo, and K. A. T. U. H. I. S. A. Suzuki. "The piezo-Hall effect in n-silicon." 22nd International Conference on the Physics of Semiconductors. Vol. 1. 1995.
- 34.** Udo, Ausserlechner. "The piezo-Hall effect in n-silicon for arbitrary crystal orientation." *SENSORS*, 2004 IEEE. IEEE, 2004.

- 35.** Hälg, B. "Piezo- Hall coefficients of n- type silicon." *Journal of applied physics* 64.1 (1988): 276-282.
- 36.** Manic, D., J. Petr, and R. S. Popovic. "Temperature cross-sensitivity of Hall plate in submicron CMOS technology." *Sensors and Actuators A: Physical* 85.1-3 (2000): 244-248.
- 37.** Gray, Paul R., et al. *Analysis and design of analog integrated circuits*. John Wiley & Sons, 2009.
- 38.** Zou, Y., et al. "Three dimensional die surface stress measurements in delaminated and non-delaminated plastic packages." 1998 Proceedings. 48th Electronic Components and Technology Conference (Cat. No. 98CH36206). IEEE, 1998.
- 39.** Ausserlechner, Udo, Mario Motz, and Michael Holliber. "Compensation of the piezo-Hall effect in integrated Hall sensors on (100)-Si." *IEEE Sensors journal* 7.11 (2007): 1475-1482.
- 40.** Bruschi, Paolo, et al. "A fully integrated single-ended 1.5–15-Hz low-pass filter with linear tuning law." *IEEE journal of solid-state circuits* 42.7 (2007): 1522-1528.
- 41.** Leroy, Sebastien, et al. "Integrated Hall-based magnetic platform for position sensing." *ESSCIRC 2017-43rd IEEE European Solid State Circuits Conference*. IEEE, 2017.
- 42.** Polley, Arup, Srinath M. Ramaswamy, and Baher Haroun. "Residual offset in silicon Hall-effect sensor: analytical formula, stress effects, and implications for octagonal Hall plate geometry." *IEEE Sensors Journal* (2020).
- 43.** Neugebauer, Martin, et al. "Weak measurement enhanced spin hall effect of light for particle displacement sensing." *Nano letters* 19.1 (2018): 422-425.
- 44.** Dupré, Nicolas, et al. "Experimental demonstration of stray-field immunity beyond 5 mt for an automotive-grade rotary position sensor." *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*. Vol. 2. No. 13. 2018.

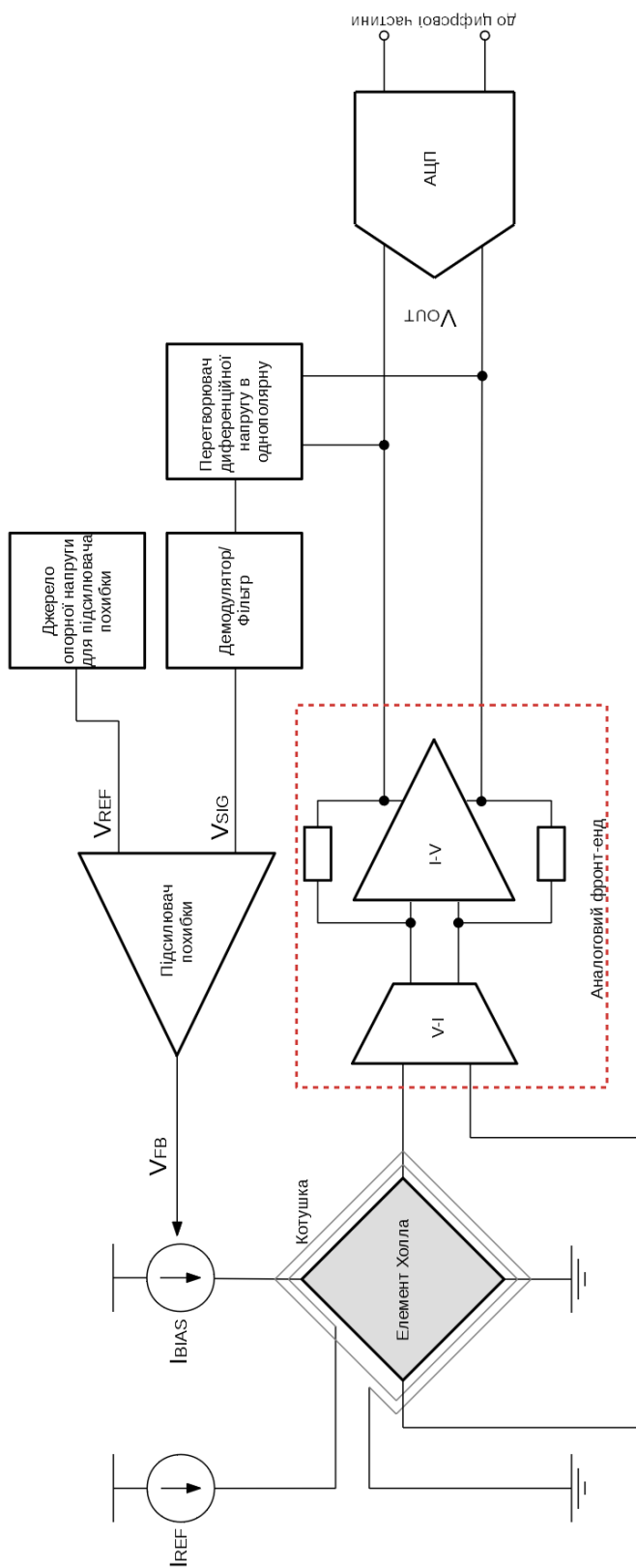
- 45.** Jiang, Junfeng, and Kofi AA Makinwa. "A hybrid multi-path CMOS magnetic sensor with 76 ppm/° C sensitivity drift and discrete-time ripple reduction loops." *IEEE Journal of Solid-State Circuits* 52.7 (2017): 1876-1884.
- 46.** Girgin, Alper, et al. "A silicon Hall sensor SoC for current sensors." *Microelectronics Journal* 90 (2019): 12-18.
- 47.** Li, Yongjia, Mario Motz, and Leneesh Raghavan. "A Fast T&H Overcurrent Detector for a Spinning Hall Current Sensor With Ping-Pong and Chopping Techniques." *IEEE Journal of Solid-State Circuits* 54.7 (2019): 1852-1861.
- 48.** Lee, Sungho, et al. "High accuracy open-type current sensor with a differential planar Hall resistive sensor." *Sensors* 18.7 (2018): 2231.
- 49.** Sen, Mehmet, et al. "Modelling of current sensor based on hall effect." 2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA). IEEE, 2017.
- 50.** Reigosa, David, et al. "Permanent magnet synchronous machine drive control using analog hall-effect sensors." *IEEE Transactions on Industry Applications* 54.3 (2018): 2358-2369.
- 51.** Wu, Han-Chen, Min-Yi Wen, and Ching-Chang Wong. "Speed control of BLDC motors using hall effect sensors based on DSP." 2016 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE). IEEE, 2016.
- 52.** Yu, Lei, Youtong Zhang, and Wenqing Huang. "Accurate and efficient torque control of an interior permanent magnet synchronous motor in electric vehicles based on hall-effect sensors." *Energies* 10.3 (2017): 410.
- 53.** Motz, Mario, and Udo Ausserlechner. "Electrical compensation of mechanical stress drift in precision analog circuits." *Wideband Continuous-time  $\Sigma\Delta$  ADCs, Automotive Electronics, and Power Management*. Springer, Cham, 2017. 297-326.
- 54.** Matthus, Christian D., et al. "High Gain and High Bandwidth Fully-Differential Difference Amplifier as Current Sense Amplifier." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* (2020).

**55.** Niwa, Akimasa, et al. "A dead-time-controlled gate driver using current-sense FET integrated in SiC MOSFET." *IEEE Transactions on Power Electronics* 33.4 (2017): 3258-3267.

**56.** Hegedűs, Ákos, Udo Ausserlechner, and Volker Strutz. "Compensation of Assembly Tolerances in Magnetic Current Sensors with External Conductor." *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science* 60.3 (2016): 163-170.

## ДОДАТОК А

### Функціональна блок-схема аналогової частини сенсора струму



## ABSTRACT

**Actuality of theme.** Advances in sensor manufacturing technologies have improved the accuracy and reliability of sensors, as well as reduced their cost. To date, many sensors are available, among which an important place is occupied by integrated sensors. The task of accurate current measurement has always been relevant for electronics. With the development of microelectronics also began the process of research and manufacture of integrated current sensors. Among the many current sensors, integrated Hall current sensors occupy a prominent place. These sensors belong to the class of magnetic sensors because they measure current not by including them in the branch of current flow, but non-contact - by measuring the magnetic field created by the flow of current through a conductor. Silicon Hall current magnetic sensors have found application in motor control systems, battery control devices, and circuit protection devices. Hall effect current sensors have certain key advantages over other magnetic sensors: they can be easily integrated into silicon. together with signal amplification circuits and control systems without additional processing steps, and their bias voltage can be compensated by dynamic compensation.

Before start of using the sensor for its intended purpose, it is usually pre-configured by the manufacturers, and in some cases by the user. However, despite the previous settings, some sensor parameters, such as sensitivity, may change during operation. These changes can be caused by various factors, such as operation in different temperature conditions, the influence of humidity levels, which in turn can cause stress, which leads to a piezoelectric effect, which can change the sensitivity of the sensor. Usually, the changes that these effects can cause are unpredictable. However, these changes can be offset. Therefore, the task of creating an integrated Hall current sensor with stress compensation circuit is relevant.

**Connection of work with scientific programs, plans, topics.** The dissertation research was conducted at the Department of Electronic Devices and Systems of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after



Igor Sikorsky" with the support of the Ministry of Education and Science of Ukraine (DB № 0119U100189 and № 0120U101285), in accordance with the Law of Ukraine "On priority areas of science" . and Technology "and" List of priority thematic areas of research and scientific and technical development for the period up to 2020 ", approved by the Cabinet of Ministers of Ukraine dated September 7, 2011 № 942. You can also purchase a prepared application for a grant from the IEEE for the program IEEE Grant for student applications applying industry standards.

**The purpose and objectives of research.** The aim of the thesis is to develop a semiconductor integrated Hall current sensor on with stress compensation circuit that will ensure the consistency of sensitivity and other parameters of the sensor during long-term operation. To achieve the network, the following tasks are solved:

1. Analysis of the principle of operation of integrated current sensors on the Hall effect.
2. Analysis of stress processes that occur during the fabrication, housing and operation of integrated sensors on the Hall effect.
3. Optimization of the current sensor topology on the Hall effect.
4. Analysis and comparison of the characteristics of current sensors on the Hall effect with magnetic compensation of voltage action.
5. Development of a startup project.

*The object of the study* is the process of voltage compensation in integrated Hall effect current sensors.

*The subject of the study* is the characteristics of the Hall effect current sensors magnetic stress compensation during long operation.

**Research methods:** The theory of electric circuits is used to solve the tasks set in the work for the development and design of an integrated Hall effect current sensor; the theory of self-regulation and control is used for development and analysis of the compensation scheme. Mathematical calculations were performed in the MATLAB software environment. Simulations of electric circuits were performed in the Cadence Virtuoso software environment. During the simulations, Monte Carlo

methods were used to statistically consider random processes in the manufacture of semiconductor integrated circuits.

**Scientific novelty of the obtained results:**

- The topology of the stress compensation system for integrated Hall effect current sensors is proposed for the first time, which differs from the existing ones by the presence of a precision filter in the feedback circuit and highly stable power supplies, which greatly simplifies the topology of other sensor parts, and also provides invariability of sensitivity of the sensor within 1% during long operation.

- The topology of the Hall driver current control system has been improved by using additional control current sources that can be used to calibrate the sensitivity of the sensor after the stage of manufacturing the IC, which provides the ability to adjust the sensitivity value to the desired value.

**Practical significance of the obtained results:**

- For the first time for the proposed topology, a statistical analysis was performed in a wide temperature range and at different possible supply voltages using Monte-Carlo methods (thus taking into account the possible variance of sensor parameters during production), the results of which confirm the sensitivity within 1%.

- The proposed voltage compensation circuit can be used not only for the Hall effect current sensors, but also for other integrated circuits that use Hall elements, such as tracking objects in space, measuring the speed and direction of motor rotation, for contactless switching.

**Personal contribution of the applicant.** The thesis is a generalization of the results of theoretical and experimental research conducted by the author himself. The work [1] was written by the author of the dissertation personally. In the work published with co-authors, a master candidate did: [2] - study of possible causes of voltage chips, analysis of ways of compensation for the effect of stress.

**Approbation of thesis results.** The main provisions of the thesis were discussed at the international scientific and technical conference of young scientists "Electronics-2020".

**Publications:**

1. Korchaka MO. “Development of a new approach to the design of integrated current sensors” / MO Korchaka // Electronic and Acoustic Engineering. - 2020. - Volume 3, №2. - P. 16–19.

2. Korchaka MO, Bondarenko OF. “Investigation of the Stress in Hall Effect Sensors” - submitted to “Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature”.

**The structure and scope of the thesis.** The thesis consists of an introduction, five sections, conclusions, a list of sources used. The total volume of the thesis is 94 pages, including 85 pages of the main text, 65 figures, 25 tables, a list of used sources from 56 titles.