

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

Приладобудівний факультет

Кафедра приладів та систем неруйнівного контролю

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Анатолій ПРОТАСОВ

«__» _____ 20__ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи
та технології неруйнівного контролю і діагностики»**

**спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»**

на тему: «Магнітний дефектоскоп на базі магніторезисторів»

Виконав:

студент IV курсу, групи ПК-71 Котлов Данило Євгенович _____

Керівник:

к.т.н., доцент Баженов Віктор Григорович _____

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2021 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
2	A4	ПК7105.0000.000 ПЗ	Пояснювальна записка	40	
3	A1	ПК7105.0000.002 Ф1	Схема функціональна	1	
4	A2	ПК7105.0000.003 Е1	Схема електрична принципова	1	
5	A4	ПК7105.0000.004 МД	Креслення магніторезисторного датчика	1	
6	A4	ПК7105.0000.005 МП	Креслення мікропроцесора	1	

				ПК7105.0000.000	
	ПІБ	Підп.	Дата		
Розробн.	Котлов Д.Є			Відомість дипломного проєкту	Лист
Керівн.	Баженов В.Г.				1
Консульт.					Листів
Н/контр.	Лашко О.В.				1
Зав.каф.	Протасов А.Г.				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ПСНК Гр. ПК-71

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Магнітний дефектоскоп на базі
магніторезисторів»**

Київ – 2021 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет
Кафедра приладів та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології неруйнівного контролю і діагностики»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Анатолій ПРОТАСОВ

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Котлов Данило Євгенович

1. Тема проєкту «Магнітний дефектоскоп на базі магніторезисторів», керівник проєкту Баженов Віктор Григорович, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «26» травня 2021 р. № 1347-с
2. Термін подання студентом проєкту 2 червня 2020 року
3. Вихідні дані до проєкту: магнітний метод неруйнівного контролю з використанням магніторезисторів, магніторезисторний датчик – частота збору даних 80 Гц, інтерфейс I2C – режим роботи швидкий, динамічний діапазон – 2000 мкТл;
4. Зміст пояснювальної записки

Вступ

1. Аналітичний огляд
2. Розробка приладу
3. Розрахункова частина

Висновки

Список використаних джерел

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) 4 кресленника

1 – Схема функціональна

2 – Схема електрична структурна

3 – Креслення магніторезисторного датчика

4 – Креслення мікропроцесора

6. Дата видачі завдання 15 лютого 2021 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Пошук матеріалів та планування пояснювальної записки	01.03.2021	
2	Проведення аналітичного огляду	10.04.2021	
3	Вибір компонентів приладу та розробка функціональної схеми	25.04.2021	
4	Розробка приладу та принципової схеми пристрою	15.04.2021	
5	Розрахунок параметрів приладу	02.06.2021	

Студент

Данило КОТЛОВ

Керівник

Віктор БАЖЕНОВ

Анотація

Під час написання дипломного проекту були розглянуті методи неруйнівного контролю, що використовуються для визначення дефектів у феромагнітних матеріалах, а також проаналізовані їх переваги та недоліки. Був спроектований дефектоскоп на основі магніторезисторів, що використовує основні принципи магнітного методу неруйнівного контролю. Проведений розрахунок параметрів спроектованого приладу, складений алгоритм передачі даних.

Мета роботи: аналіз ефективних методів неруйнівного контролю для визначення дефектів в складних за формою об'єктах та побудова пристрою для їх знаходження.

Предмет дослідження: методи неруйнівного контролю складних поверхонь.

Наукова новизна: компактний прилад для знаходження дефектів на основі порушення магнітного поля.

Дипломний проект складається із пояснювальної записки обсягом 46 сторінок, включає 29 ілюстрацій, 4 таблиці, 4 кресленика, 11 посилань та 37 формул.

Ключові слова: магнітний неруйнівний контроль, магніторезистори, I2C, SPI, USART, поле розсіювання дефекту, мікроконтролер, послідовні протоколи передачі даних.

Annotation

During the writing of the diploma project the methods of non-destructive testing used to determine defects in ferromagnetic materials were considered, as well as their advantages and disadvantages were analyzed. A flaw detector based on magnetoresistors was designed, which uses the basic principles of the magnetic method of non-destructive testing. The calculation of the parameters of the designed device is carried out, the algorithm of data transfer is made.

Purpose: analysis of effective methods of non-destructive testing to identify defects in complex objects and construction of a device for their location.

Object of research: methods of non-destructive testing of complex surfaces.

Scientific novelty: a compact device for finding defects based on the excitation of the magnetic field.

The diploma project consists of an explanatory note of 46 pages, includes 29 illustrations, 4 tables, 4 drawings, 11 references and 37 formulas.

Keywords: magnetic non-destructive testing, magnetoresistors, I2C, SPI, USART, magnetic flux leakage, microcontroller, serial data transmission protocols.

Скорочення та позначення

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

НК – неруйнівний контроль.

МНК – магнітний неруйнівний контроль.

ОК – об'єкт контролю.

МП – мікропроцесор.

ЕРС – електрорушійна сила

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1. Аналітичний огляд	8
1.1. Загальна характеристика магнітних методів неруйнівного контролю	8
1.2. Магніторезистивний ефект	13
1.3. Технології магніторезисторів	15
1.3.1. Монолітні магніторезистори.....	17
1.3.2. Застосування магніторезисторів.....	18
1.4. Послідовні протоколи передачі даних.....	20
2. Розробка приладу	28
2.1. Схема та принцип роботи приладу	28
2.2. Вибір мікроконтролера.....	29
2.3. Вибір магніторезисторного датчика	33
3. Розрахункова частина	37
3.1. Розрахунок поля розсіювання дефекту.....	37
3.2. Розрахунок частоти передачі даних інтерфейсом I2C	38
3.3. Розрахунок часу збору та зчитування даних.....	41
3.4. Розрахунок параметрів АЦП.....	42
Висновок	44
Список використаних джерел	45

					ПК7105.0000.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Котлов Д.Є.			Магнітний дефектоскоп на базі магніторезисторів	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Баженов В.Г.					6	46
Реценз.						КПІ ім. Ігоря Сікорського гр. ПК-71		
Н. Контр.								
Затверд.								

Вступ

Для знаходження дефектів в об'єктах контролю багато методів неруйнівного контролю потребують ретельної підготовки зразка, мають малу ефективність, мають недолік у вигляді складності автоматизації або можуть бути застосовані лише для певних поверхонь.

З розвитком методів неруйнівного контролю вдалося значно збільшити їх точність. Це стосується і магніторезистивного неруйнівного контролю, який на сьогоднішній день здатний виявляти дефекти навіть без намагнічування об'єкту контролю, використовуючи магнітне поле землі.

Враховуючи активний розвиток технології магніторезисторів в наш час, неруйнівний контроль за допомогою магніторезисторів має значні перспективи в майбутньому як багатофункціональна альтернатива вихрострумовому та магнітопорошковому методам неруйнівного контролю.

					ПК7105.0000.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1. Загальна характеристика магнітних методів неруйнівного контролю

Методи неруйнівного контролю (НК) – методи контролю надійності та цілісності об'єктів контролю, що засновуються на спостереженнях, реєстрації та аналізі результатів взаємодії фізичних полів або речовин з об'єктом контролю, причому характер цього взаємодії залежить від хімічного складу, будови, стану керованого об'єкта та ін. [1]

Універсального методу неруйнівного контролю, здатного виявити всі різноманітності дефектів, немає. Кожен окремо взятий метод НК вирішує обмежений набір задач.

Неруйнівний контроль є критичним на більшості виробництв, часто навіть поєднуючись з руйнівним контролем та іншими видами НК для мінімізації ризиків. Деякі методи неруйнівного контролю можуть бути автоматизовані, що знаходить їх широке застосування під час серійного виробництва продукції.

Наразі найбільше поширення мають наступні методи НК:

- Магнітний
- Вихрострумний
- Радіаційний
- Тепловий
- Оптичний
- Ультразвуковий
- Капілярний, та ін.

					ПК7105.0000.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для знаходження дефектів в об'єктах контролю різні методи неруйнівного контролю потребують ретельної підготовки зразка, мають малу ефективність, мають недолік у вигляді складності автоматизації або можуть бути застосовані лише для певних поверхонь.

Проте на сьогоднішній день під час контролю металевих поверхонь є можливість подолати більшість наведених вище недоліки. Досі розповсюджені види магнітного неруйнівного контролю базуються на намагнічуванні об'єкта контролю, проте набирають поширення і більш сучасні і точніші види, які здатні працювати за умов природного магнітного поля Землі.

До дефектів, що виявляються магнітним методом, відносять такі дефекти як: тріщини, волосовини, неметалеві включення, несплавлення, флок. Виявлення дефектів можливо в тому випадку, якщо вони виходять на поверхню виробу або залягають на малій глибині (не більше 2-3 мм).

Магнітні методи засновані на вивченні магнітних полів розсіювання навколо виробів з феромагнітних матеріалів після намагнічування. У місцях розташування дефектів спостерігається перерозподіл магнітних потоків і формування магнітних полів розсіювання. Для виявлення і фіксації потоків розсіювання над дефектами і використовуються різні методи.

Основним обмеженням для об'єкта контролю при застосуванні магнітного неруйнівного контролю є наявність у матеріалі виробу феромагнітних властивостей, а також розташування ОК в магнітному полі.

Розглянемо різновиди МНК за способом отримання первинної інформації:

Магнітопорошковий метод (рис.1.1) широко використовується, не дивлячись на те, що автоматизація такого методу є невиправдано складною. Зазвичай за допомогою цього методу виявляють підповерхневі та поверхневі дефекти.

					ПК7105.0000.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Базується даний метод на нанесенні магнітної суспензії на поверхню намагніченого ОК, під дією полів розсіювання дефектів магнітні частинки збираються в області дефектів.

Перевагами метода є простота та інформативність отриманих результатів – можливо досить точно оцінити відносні розміри дефекту та його розташування. Проте до недоліків можна віднести вже названу складність автоматизації, а також сильний вплив геометричних та структурних особливостей ОК.

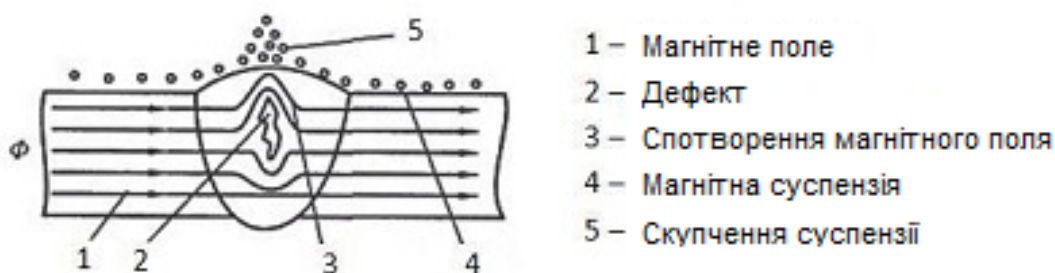


Рис.1.1. Магнітопорошковий метод контролю

Проведення магнітопорошкового контролю складається з наступних етапів:

- Підготовка поверхні до контролю, очистка
- Намагнічування ділянки проведення контролю
- Нанесення суспензії
- Візуальний огляд поверхні на місця скупчень суспензії
- Розмагнічування ділянки

Індукційний метод має за основу явище виникнення е.р.с. в котушці під час її руху відносно намагніченого ОК. Під час намагнічування ОК, в змінному магнітному полі виникають поля розсіювання дефекті, що спричиняють виникнення індуктивної е.р.с. в котушці спеціального шукача (рис. 1.2).

Перевагою такого метода є технологічна простота та можливість автоматизації. Недоліком є низька чутливість методу.

					ПК7105.0000.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

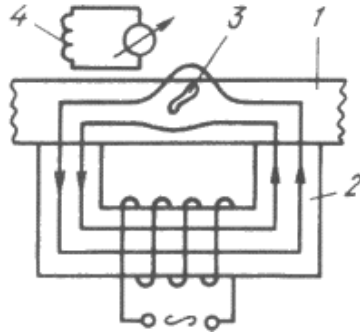


Рис. 1.2. Схема проведення контролю індукційним методом: 1 - виріб; 2 - електромагніт; 3 - дефект; 4 –шукач

Магнітоферозондовий метод, як слідує з назви, використовує в якості первинних перетворювачів ферозонди (рис.1.3) – чутливі елементи для виявлення та вимірювання магнітного поля.

Основними перевагами є висока точність, можливість автоматизації та можливість виявлення дефектів на глибині до 1 см. Недоліками є, як і у магнітопорошковому методі вплив конструктивних параметрів на результат контролю, а також складність у порівнянні з іншими магнітними методами [2].

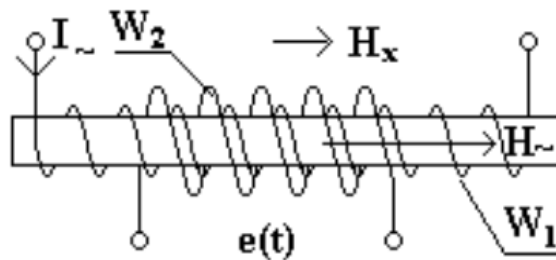


Рис. 1.3. Схематичне зображення ферозонду [3]

Магнітографічний метод контролю базується на фіксації поля розсіювання дефекта на еластичній магнітній стрічці і наступному відтворенні результатів за допомогою електропрменевої трубки або інших пристроїв (рис. 1.4) [3, 4].

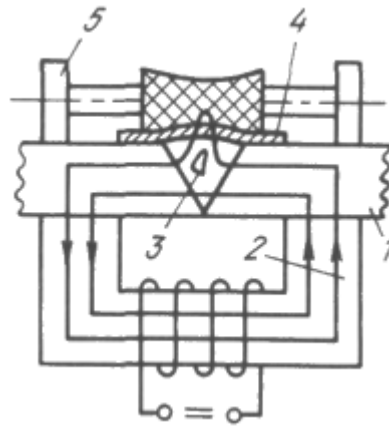


Рис. 1.4. Схема проведення контролю магнітографічним методом: 1 – виріб; 2 – електромагніт; 3 – дефект; 4 – магнітна стрічка; 5 – ролик

Послідовність дій при магнітографічному методі контролю наступна:

- Огляд та підготовка поверхні виробу, її очистка
- Накладення на виріб попередньо розмагніченої магнітної плівки
- Намагнічування виробу
- Розшифрування результатів контролю

Використовується метод в основному для контролю зварних швів товщина яких зазвичай не перевищує 25 мм.

Перевагами метода є простота та дешевизна, висока точність і чутливість при виявленні плоских дефектів – тріщин, непроварів, неметалевих включень. Також можна віднести можливість збереження результатів на магнітній стрічці

Проте, до недоліків можна віднести відсутність миттєвої наочності, можливість значних похибок при контролі нерівної та шорсткої поверхні, а також низька ефективність при виявленні широких та округлих дефектів.

Магніторезистивний метод заснований на магніторезистивному ефекті у результаті якого опір провідника значно збільшується при внесенні його в магнітне поле.

					ПК7105.0000.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перевагами такого методу є можливість автоматизації, висока точність, можливість горизонтального та вертикального масштабування та компактність, можливість вимірювання у 3 осях.

1.2. Магніторезистивний ефект

Під магніторезистивним ефектом розуміють наявність залежності питомого опору напівпровідника від магнітного поля, а саме магнітної індукції.

Насправді, магніторезистивним ефектом володіють усі матеріали, але найбільше виражений саме в напівпровідниках. Проте, в надпровідниках магніторезистивний ефект має місце починаючи з деякого критичного значення напруженості електричного поля [5].

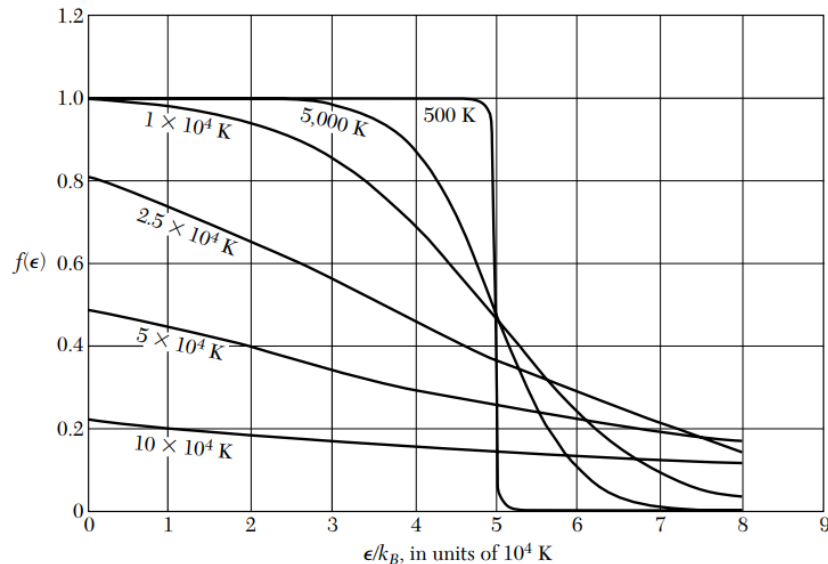


Рис. 1.5. Розподіл Фермі-Дірака

Явище магніторезистивності має в основі нерівномірність швидкостей носіїв заряду. Їх швидкості підкоряються статистичному розподілу Фермі-Дірака (рис. 1.5). В результаті цього – поперечне поле Холла компенсує вплив сили Лоренца на носії заряду, що мають середню швидкість дрейфу v . Тому будуть існувати носії заряду, траєкторія яких буде викривлена, що призведе до збільшення числа колізій носіїв, тим самим збільшуючи питомий опір напівпровідника [6].

За умови слабких магнітних полів ($\mu B \ll 1$), приріст питомого опору може бути описаний наступною залежністю [7]:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_B} = \frac{\sigma_0 - \sigma_B}{\sigma_0} = \frac{4 - \pi}{\pi} \left(\frac{3\pi}{8}\right)^2 (\mu B)^2 \quad (1.1)$$

$$\left[T_{\text{л}} * \frac{\text{м}^2}{\text{В} * \text{с}} \right]^2 = \left[\frac{\text{В} * \text{с}}{\text{м}^2} * \frac{\text{м}^2}{\text{В} * \text{с}} \right]^2 = [1]$$

Де $\Delta\rho$ – абсолютний приріст питомого опору,

ρ_B – питомий опір в магнітному полі з індукцією B

B – магнітна індукція

σ – питома електрична провідність

μ – рухомість носіїв заряду, $\left[\frac{\text{м}^2}{\text{В} * \text{с}}\right]$

Таким чином, за малих значень магнітної індукції величина приросту питомого опору пропорційна квадрату магнітної індукції, якщо значення магнітної індукції велике – залежність опору стає лінійною, а у випадку дуже великих значень індукції відбувається магнітне насичення – стан, за якого намагніченість досягає порогового максимального значення (рис. 1.6).

					ПК7105.0000.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

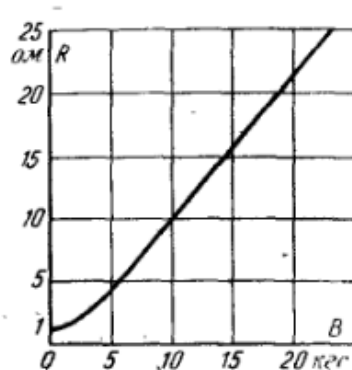


Рис. 1.6. Залежність опору від магнітного поля для магніторезистора типу HS41 [8]

1.3. Технології магніторезисторів

Магніторезистори – електронні компоненти, які діють спираючись на зміну електричного опору напівпровідника при дії на нього магнітного поля.

Основні параметри, за якими характеризуються магніторезистори наведені в таблиці 1.

Параметр	Позначення	Одиниця вимірювання	Визначення
Початковий опір	R_0	Ом	Опір магніторезистора за відсутності магнітного поля (За нормальних умов та $B=0$)
Опір при впливі магнітного поля	R_B	Ом	Опір магніторезистора при впливі магнітного поля (За нормальних умов)
Відносна магнітна чутливість	γ	в.о.	Відносна зміна опору, викликана магнітним полем певної індукції

Температурний коефіцієнт опору	TK_R	%/К	Коефіцієнт, що характеризує залежність опору від температури. $(\frac{100*\Delta R}{R_0*\Delta T})$ (рис. 1.7)
Температурний коефіцієнт чутливості	γT	%/К	Коефіцієнт, що характеризує залежність магнітної чутливості від температури. $(\frac{100*\Delta \gamma}{\gamma_0*\Delta T})$

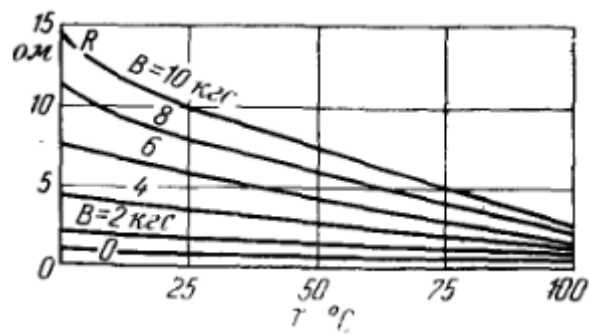


Рис. 1.7. Температурна характеристика магніорезистора типу HS41

Крім наведених вище параметрів, які зазвичай є показовими для оцінки якості магніорезисторів, існують експлуатаційні параметри, такі як робочий струм, швидкодія, діапазон робочих температур та ін.

Магніорезистори поділяються на *монолітні* та *плівкові*. В основі плівкових магніорезисторів (рис. 1.8) лежить анізотропний магніорезистивний ефект – квантовомеханічний ефект, що полягає в зміні електричного опору провідника в залежності від його орієнтації в просторі відносно зовнішнього магнітного поля [9].

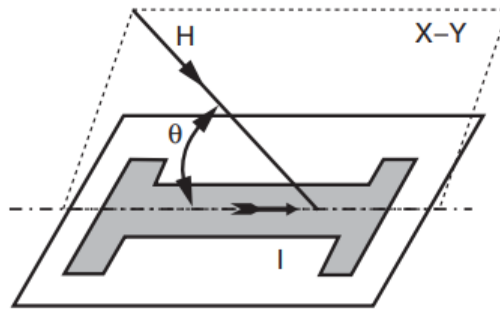


Рис. 1.8. Плівковий магніторезистор

Особливістю таких магніторезисторів є те, що при впливі магнітного поля, їх опір зменшується.

1.3.1. Монолітні магніторезистори

На відміну від плівкових магніторезисторів, монолітні засновані на ефекті Гаусса (магніторезистивному ефекті, розглянутому раніше), тобто збільшенні опору провідника при розміщенні його в магнітному полі.

Конструкція монолітного резистора складається з підкладки, на якій розміщений магніто-чутливий елемент (рис. 1.9).

Виготовляють монолітні магніторезистори з напівпровідникових матеріалів, що володіють підвищеною рухливістю носіїв заряду. Популярним вибором є різні сполучення Індію.

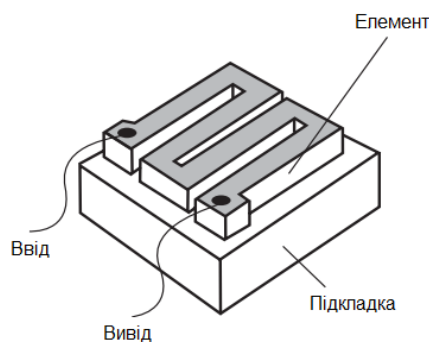


Рис. 1.9. Монолітний магніторезистор

					ПК7105.0000.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Як було зазначено раніше – основна зміна опору та чутливості відбувається при зміні магнітної індукції, але важливою є також зміна чутливості при зміні кута між вектором магнітної індукції та площиною елемента. Ця залежність може бути описана наступною формулою:

$$\frac{R_B - R_0}{R_0} = \left[\frac{R_B - R_0}{R_0} \right]_{max} * \frac{\sin^2 \phi}{1 + (\mu B)^2 * \cos^2 \phi}, (1.2)$$

Де ϕ – кут між векторами напруженості електричного та магнітного полів

Як правило, для монолітних магніторезисторів, максимальна чутливість досягається при нормально падаючому магнітному потоку (тобто $\phi = 90^\circ$).

Часто магніточутливі елементи виготовляють зі сплавів антимоніту індію та антимоніту нікелю (InSb - NiSb), вони мають форму меандра з шириною доріжки близько 100 мкм.

1.3.2. Застосування магніторезисторів

Магніторезистори знайшли широке застосування не тільки в сфері неруйнівного контролю, а й у багатьох напрямках, де застосовуються феромагнітні матеріали, наприклад – реєстрація магнітного потоку та вимірювання магнітної індукції, датчик швидкості переміщення або обертання, в комбінації з акселерометрами можуть використовуватися для навігації та просторової орієнтації. Магніторезистори часто застосовуються в датчиках рідини та газу, безконтактних системах та системах автоматичного управління.

Сучасні магніторезистори дозволяються організовувати матричні системи (в багатьом завдяки системам передачі даних, які будуть розглянуті далі), які дають можливість гнучкого налаштування під будь-яку задачу.

Плівкові магніторезистори орієнтовані в основному на невеликі значення індукції магнітного поля (10-30 мТл), що впливає на їх широке застосування в напрямках не пов'язаних з контролем.

					ПК7105.0000.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Монолітні магнітрезистори з іншого боку орієнтовані на роботу з більш сильними магнітними полями (100-1000 мТл), проте обмежень на розширення діапазону в меншу сторону немає, але при збільшенні індукції необхідно бути пильним щодо збільшення температури магнітрезистора.

Визначення напрямку вектору магнітного поля Землі є одним з найпоширеніших застосувань магнітрезисторів, зазвичай в якості додаткового функціоналу в портативних пристроях.

Вимірювання напрямку зазвичай зводиться до вимірювання горизонтальної та вертикальної складових напруженості магнітного поля (рис.1.10).

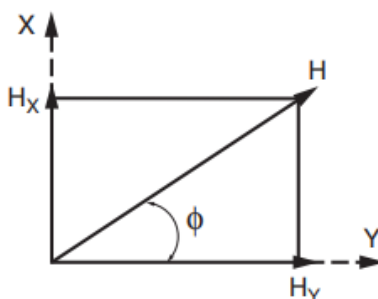


Рис. 1.10. Складові вектору напруженості магнітного поля

Відповідно, тангенс кута ϕ визначається наступним рівнянням:

$$\operatorname{tg}\phi = \frac{H_y}{H_x} \quad (1.3)$$

Як правило, для визначення напрямку використовують 2 магніточутливих елементи, які розташовані перпендикулярно, для реєстрації обох складових напруженості.

Основним недоліком магнітних компасів є необхідність введення поправок через нерівномірність та змінність магнітного поля землі. Через недосконалість пристроїв орієнтації на відповідальних установах використовуються системи з різних видів навігації.

В неруйнівному контролі принцип застосування магніторезисторів, як і багатьох інших магніточутливих елементів полягає в реєстрації зміни напруженості магнітного поля розсіювання біля дефекту (рис. 1.11).

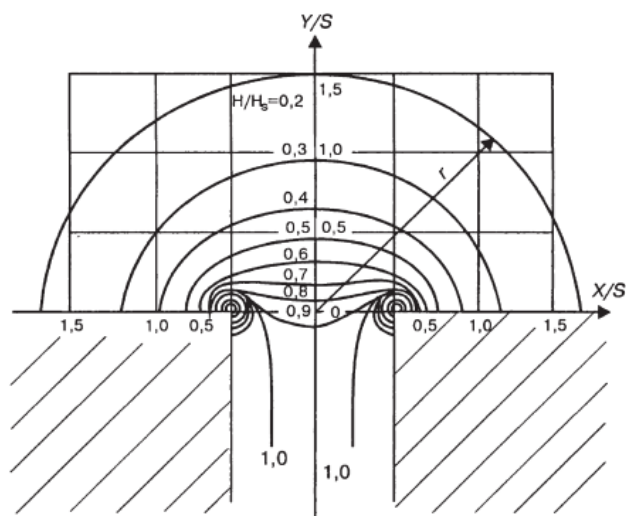


Рис. 1.11. Магнітне поле розсіювання над дефектом [10]

Як правило об'єкт контролю попередньо намагнічується, але у випадку, якщо магніторезистор володіє дуже високою точністю – намагнічування необов'язкове, проте для збільшення глибини контролю можливе збільшення напруженості магнітного поля.

Залежно від розміру дефекту магнітне поле розсіювання може досягати 20 мТл або ж навпаки доходити до 1 мкТл, реєстрація таких полів може бути проблематичною для ферозондового методу через те, що розміри чутливого елемента значно перевищують розміри поля розсіювання, через що роздільна здатність страждає.

1.4. Послідовні протоколи передачі даних

Під протоколами передачі даних розуміють узгоджені набори правил, які визначають особливості обміну даними між пристроями (у тому числі і між мікросхемами).

					ПК7105.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Послідовні протоколи передачі даних являють собою вид зв'язку, за якого данні передаються один за одним, послідовно, а не паралельно. Перевагою такого підходу є менша кількість фізичних зв'язків та відсутність необхідності розподілення інформації по паралельним каналам.

Протоколи можна поділити на 2 групи – синхронні та асинхронні. З'єднання з синхронним зв'язком мають в основі систему, що узгоджує передачу даних, таку як джерело тактових імпульсів. Асинхронні елементи системи працюють згідно власних систем тактування.

Найбільш широко застосовуваними протоколами передачі даних в мікроконтролерах на сьогоднішній день є технології UART, SPI та I2C.

UART (universal asynchronous receiver/transmitter) – вузол мікросхеми для асинхронного зв'язку між цифровими приладами. Має 2 з'єднання, які відповідають за отримання даних (RX, Receiver), та відправлення даних (TX, Transmitter) (рис. 1.12). В основі лежать зсувні регістри.

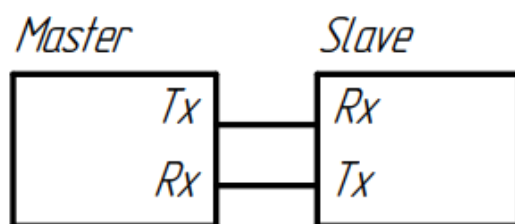


Рис. 1.12. Схема з'єднання пристроїв за протоколом UART

Дані передаються та отримуються по бітам, починаючи з молодшого біта. Операція починається з стартового сигналу та закінчується стоповим, які зазвичай «обрамляють» набір інформації в 8 біт (рис. 1.13).

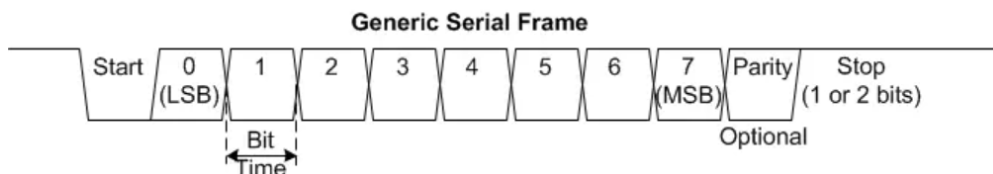


Рис. 1.13. Часова діаграма передачі даних за протоколом UART

Для узгодження зчитування та відправки даних, прилади оперують на однакових швидкостях (bitrate), що вимірюються в бодах (1 бод = 1 біт/с). Стандартними є швидкості 300, 600, 1200 і т.д. до 921600 бод.

Перевагами UART є: простота, відсутність необхідності в тактових імпульсах, можливість перевірки цілісності даних.

Недоліками UART є: обмеженість розміру пакету даних, неможливість використання для декількох підлеглих та ведучих приладів, необхідність точного узгодження швидкостей, низька швидкість.

SPI (Serial Peripheral Interface) – протокол послідовного зв'язку синхронного типу, що складається з 2 ліній даних (MISO для отримання на ведучому, та MOSI для відправлення з ведучого), тактової лінії (SCLK) та ліній вибору підлеглого (\overline{SS}_n) (рис. 1.14).

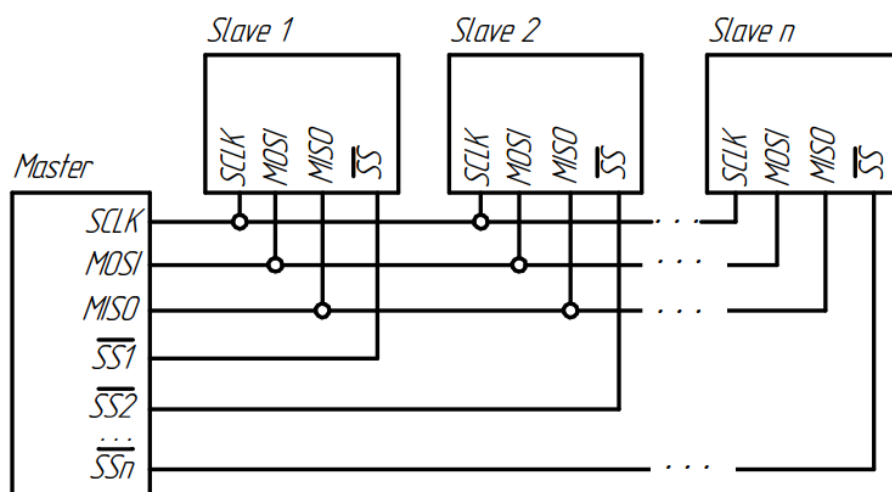


Рис. 1.14. Схема з'єднання приладів за протоколом SPI

В основі цього протоколу лежать зсувні регістри, які одночасно з ведучого та підлеглого пристрою обмінюються даними (рис. 1.15). Зміна активного підлеглого здійснюється після отримання пакету.

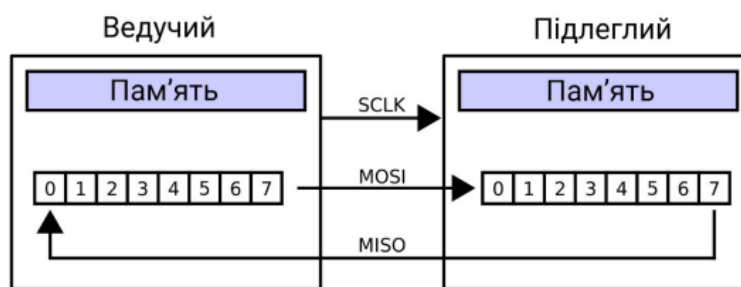


Рис. 1.15. Передача даних по шині SPI

Частота обміну даними визначається частотою тактових імпульсів отримуваних з SCLK ведучого пристрою. Дані обмінюються пакетами довжиною зазвичай 1 байт.

Ініціація обміну здійснюється наступним чином [11]:

1. SS необхідної мікросхеми переводиться у низький рівень
2. Вивід MISO підлеглого переводиться в режим виводу
3. Тактовий сигнал розпочинає зчитування
4. Зчитування переданих від ведучого пристрою бітів на вході MOSI та відправлення бітів з виводу MISO

Існують також 4 комбінації полярності та фази тактового сигналу, що визначаються бітами CPHA (clock phase) та CPOL (clock polarity). Режим 0 (CPOL = 0, CPHA = 0), режим 1 (CPOL = 0, CPHA = 1), режим 2 (CPOL = 1, CPHA = 0), режим 3 (CPOL = 1, CPHA = 1) (рис. 1.16).

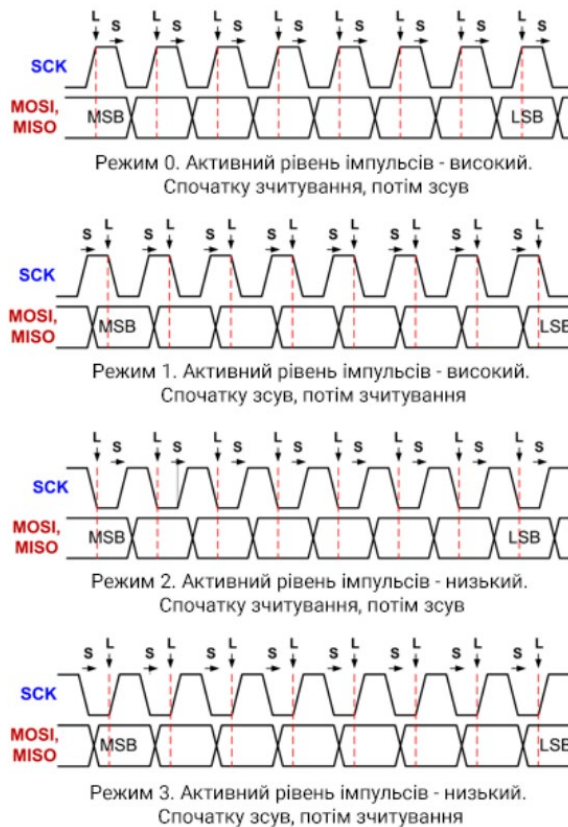


Рис. 1.16. Режими роботи SPI

CPOL визначає початковий рівень тактового сигналу (0 – низький, 1 – високий); CPHA визначає по якому фронту буде відбуватися зчитування даних (0 – по передньому, 1 – по задньому)

Перевагами SPI є: простота звернення до підлеглих пристроїв (порівняно з I2C), швидший за UART та I2C, немає необхідності в бітах старту та стопу, через що дані можуть передаватися неперервно, дані можуть бути відправлені та отримані одночасно через наявність 2 ліній даних.

Недоліками SPI є: необхідність проведення окремої лінії вибору підлеглого до кожного пристрою, через що кількість підлеглих обмежена, немає контролю цілісності даних та гарантії їх надходження, використання як мінімум 4 ліній, тільки ведучий може керувати потоком даних.

I2C (Inter-Integrated Circuit) – протокол послідовного зв'язку синхронного типу, який складається з 2 ліній зв'язку – двонаправленої лінії даних (SDA) та лінії тактування (SCL) (рис. 1.17).

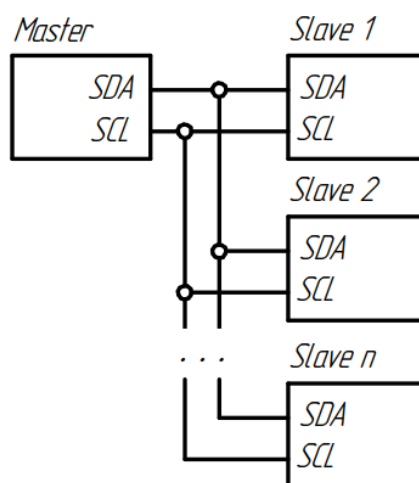


Рис. 1.17. Схема з'єднання приладів за протоколом I2C

Особливістю I2C є те, що вона дозволяє з'єднувати велику кількість пристроїв завдяки системі адресації приладів, яка підтримує від 127 до 1023 приладів (залежно від розміру пакету з адресою).

Процес передачі даних використовуючи протокол I2C відбувається наступним чином (рис. 1.18):

1. Встановлення СТАРТ-стану – високого рівня на SCL, потім – низького рівня на лінії SDA.
2. Під час відправлення даних до підлеглого – ведучий генерує тактові імпульси та встановлює дані. Коли підлеглий отримує імпульси синхронізації – він зчитує дані.
3. При отриманні ведучим даних – ведучий генерує тактові імпульси та відслідковує лінію SDA, підлеглий в свою чергу виставляє біт даних на SDA по приходу низького рівня на лінії SCL, який ведучий зчитує за високого рівня на SCL.

4. Передача даних завершується встановленням СТОП-стану – високого рівня на SCL, потім – переходом з низького на високий рівень лінії SDA.

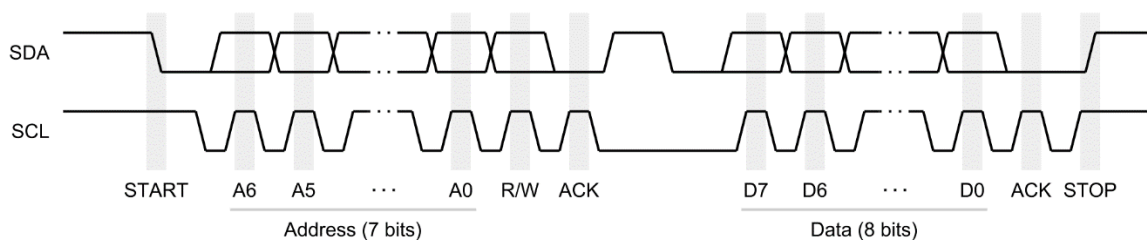


Рис. 1.18. Часова діаграма передачі даних за протоколом I2C з адресою

Дані зазвичай передаються пакетами з 9 біт (8 біт даних, 1 біт підтвердження), причому першим пакетом відправляється адреса пристрою у вигляді 7-бітного значення, 1 біта, який вказує на режим запису або зчитування та біта підтвердження. Для зміни адреси або зміни режиму роботи використовується команда «повторний старт», який дозволяє не звільняти шину. Повторний старт являє собою перехід лінії даних з високого на низький рівень за високого рівня на лінії тактування.

Перевагами I2C є: невелика кількість ліній зв'язку навіть за великої кількості пристроїв, можливість створення конфігурації з декількома ведучими пристроями, простота підключення, можливість налаштування алгоритму під різні системи.

Недоліками I2C є: менша за SPI швидкість, обмеження по ємності, складність локалізації помилок, збільшення кількості підлеглих пристроїв поверх розміру пакету може призвести до ускладнень.

Таким чином, проаналізувавши різні протоколи, можна обрати необхідний для певних цілей, так UART часто використовується для з'єднання усього двох приладів, через що поширений в схемах зв'язку в сполученні з GPS, Bluetooth, Wi-Fi, GPRS, тощо. SPI, як найшвидший з трьох використовується в системах, де велику роль грає швидкість – USB, flash- та EEPROM пам'ять, SD-карти, Ethernet системи, об'єктиви камер, АЦП та ЦАП,

					ПК7105.0000.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

датчики температури та тиску, тощо. I2C часто використовується для контролю великої кількості підлеглих пристроїв, наприклад керування світлодіодами, регулювання кольору моніторів, виведення даних на дисплей, інформаційний обмін між мікросхемами, керування живленням, та ін.

Багато сучасних магніторезисторів обладнані інтерфейсом I2C через можливість їх поєднання в матричні системи вимірювання, що складаються з великої кількості магніторезисторів, це дозволяє збільшити швидкість сканування об'єкту контролю, дає можливість будувати тривимірні моделі об'єкту контролю навіть складної форми, покращує точність, тощо.

Висновок до розділу

В даному розділі були проаналізовані фізичні засади магнітного неруйнівного контролю та принципів функціонування магніторезисторів, розглянуті приклади їх загального застосування в сучасній техніці. Були описані поширені протоколи передачі даних, такі як UART, SPI, I2C, проаналізовані їх переваги та недоліки, наведені сфери застосування, пояснений їх алгоритм роботи. В якості бажаного інтерфейсу передачі даних обраний I2C, що дозволяє поєднувати велику кількість підлеглих. У випадку з магніторезисторними датчиками, інтерфейс I2C надає можливість створювати матриці з великої кількості датчиків та контролювати таким чином складні поверхні, а також виявляти дефекти різних форм та орієнтацій.

					ПК7105.0000.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 2. РОЗРОБКА ПРИЛАДУ

2.1. Схема та принцип роботи приладу

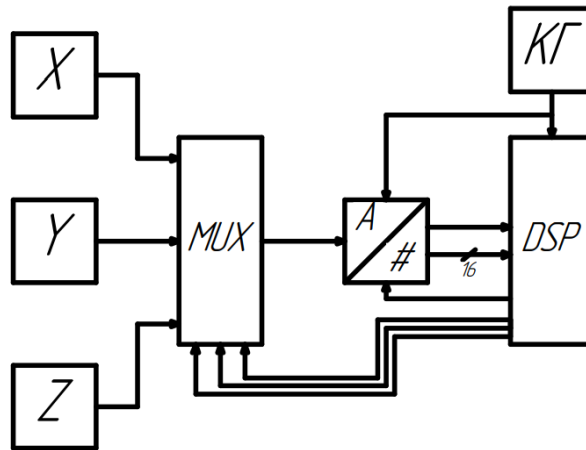


Рис. 2.1. Функціональна схема магніторезисторного датчика MAG3110

Під час вимірювання дефекту виникає магнітне поле розсіювання дефекту, розглянуте раніше. Параметром, що впливає на реєстрацію дефекту є напруженість магнітного поля.

Магніторезистор, функціональна схема якого наведена на рис. 2.1, вимірює значення напруженості магнітного поля по трьом перпендикулярним складовим X, Y, Z, що підключені до мультиплектора MUX. Вивід мультиплектора керується сигналом з процесора цифрових сигналів DSP. Аналоговий сигнал потрапляє на АЦП, точність та адреса запису якого також контролюється DSP. Цифровий сигнал потрапляє на DSP, де записується у відповідні осям реєстри у вигляді двійкового коду зі знаком. Кожній осі присвоєно 2 реєстри по 8 бітів для старших та молодших розрядів.

					ПК7105.0000.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У вигляді послідовного коду отримані значення напруженості магнітного поля по трьом осям передаються на мікроконтролер через інтерфейс I2C. На мікроконтролері дані обробляються та готуються до візуалізації.

Далі, мікроконтролер по інтерфейсу I2C робить запити на певні комірки пам'яті в OLED-дисплеї та записує значення кольору пікселів відповідно даних візуалізації отриманих раніше.

2.2. Вибір мікроконтролера

Порівняємо широко поширений мікроконтролер STM32F103C8T6 та набираючий популярність STM32F411CEU6.

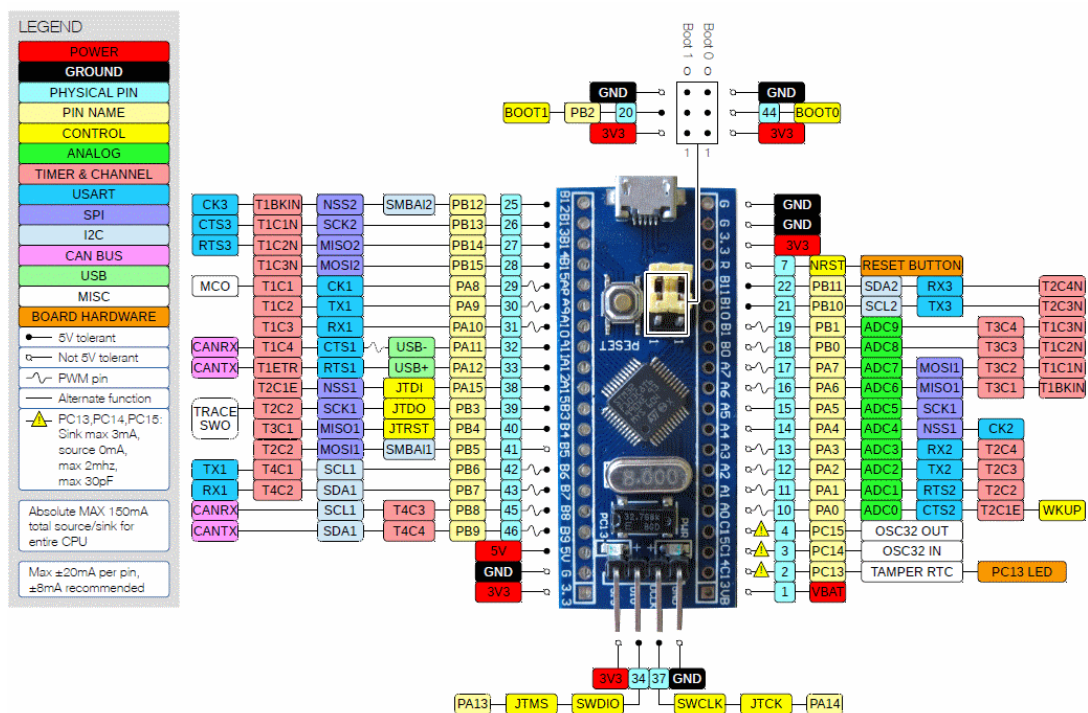


Рис. 2.2. Виводи плати на базі мікроконтролера STM32F103C8T6

Розглянемо характеристики мікроконтролера STM32F103C8T6. Плата на базі мікроконтролера, часто іменована “Blue Pill” має наступні особливості [12]:

- Два кварци 8 МГц та 32768 Гц для тактування ядра та тактування годинника реального часу відповідно
- Стабілізатор напруги 3.3 В, для можливості живлення від 5 В
- Micro-USB роз'єм
- Роз'єм для підключення SWD програматора
- Два вбудованих світлодіоди
- Два джампери для вибору області пам'яті з яких буде виконуватися початкове завантаження мікроконтролера

Сам мікропроцесор базується на ядрі ARM Cortex-M3, яке використовується у багатьох портативних пристроях, в тому числі в мобільних телефонах, планшетах і навіть ноутбуках, завдяки зменшеному енергоспоживанню.

Далі, подивимось на мікроконтролер STM32F411CEU6.

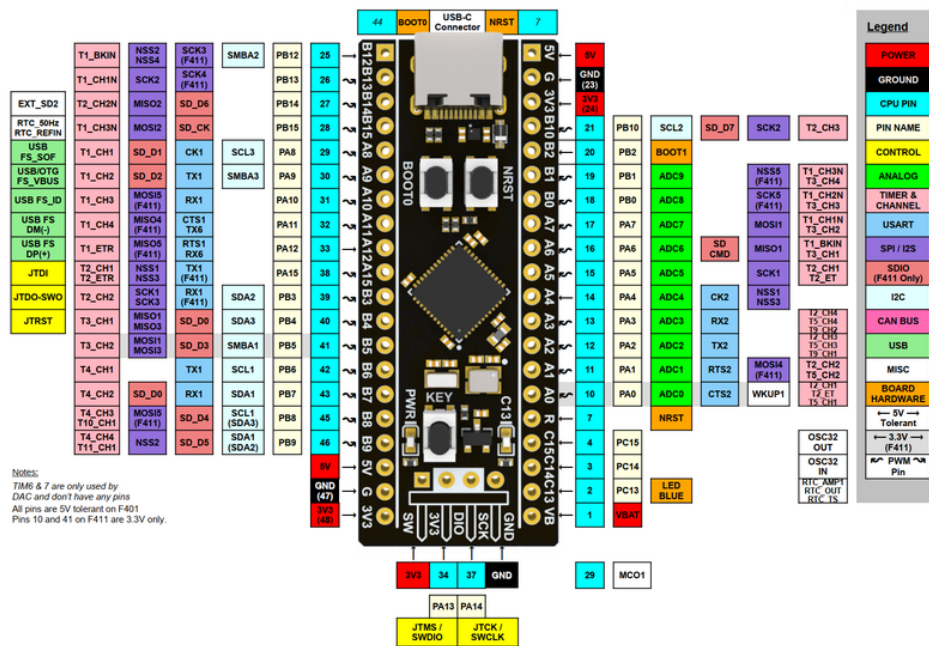


Рис. 2.3. Виводи плати на базі мікроконтролера STM32F411CEU6

На відміну від мікроконтролеру STM32F103C8T6, на даній платі встановлено більш нове ядро Cortex-M4F, частота якого сягає 100 МГц.

Значною деталлю є наявність більш нового різновиду USB – USB Type-C, який набуває поширення серед розробників портативних девайсів.

Порівняємо характеристики двох мікроконтролерів:

	STM32F103C8T6	STM32F411CEU6
Розрядність мікропроцесора	32 біти	32 біти
Максимальна частота	72 МГц	100 МГц
Flash-пам'ять	64 кБ	512 кБ
Оперативна пам'ять	20 кБ	128 кБ
Кількість виводів	36	36
Кількість таймерів	7	11
Кількість інтерфейсів UART	3 (6.25 Мбіт/с)	3 (2x12.5 Мбіт/с, 1x6.25 Мбіт/с)
Кількість інтерфейсів SPI	2 (18 Мбіт/с)	5 (50 Мбіт/с)
Кількість інтерфейсів I2C	2	3
Кількість інтерфейсів CAN	1	-
Кількість інтерфейсів USB	1	1
АЦП	2 АЦП на 10 каналів	1 АЦП на 16 каналів
Розрядність АЦП	12 біт	12 біт
Час перетворення АЦП	1 мкс	1 мкс
Напруга живлення мікроконтролера	2...3,6 В	1.7...3.6 В
Напруга живлення плати	3.3 - 5 В	3.3 - 5 В
Струм споживання	До 50 мА	До 50 мА
Розміри плати	53*22.5 мм	52.8*20.8 мм
Діапазон робочих температур	-40°C..+85°C	-40°C..+85°C

Обидві плати надають можливість користування багатьма інтерфейсами передачі даних, в тому числі SPI, UART, I2C. Плати мають значні переваги:

- Низька ціна
- Низьке енергоспоживання
- Гнучкість налаштування та програмування

					ПК7105.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

- Невеликі розміри
- Наявність багатьох інтерфейсів передачі даних, а також АЦП
- Існування значної кількості бібліотек для роботи з периферією
- Зручність програмування на відлагодження

Проте серед двох плат очевидні переваги має STM32F411CEU6, головною з яких є наявність додаткових інтерфейсів передачі даних, які оперують на великих швидкостях.

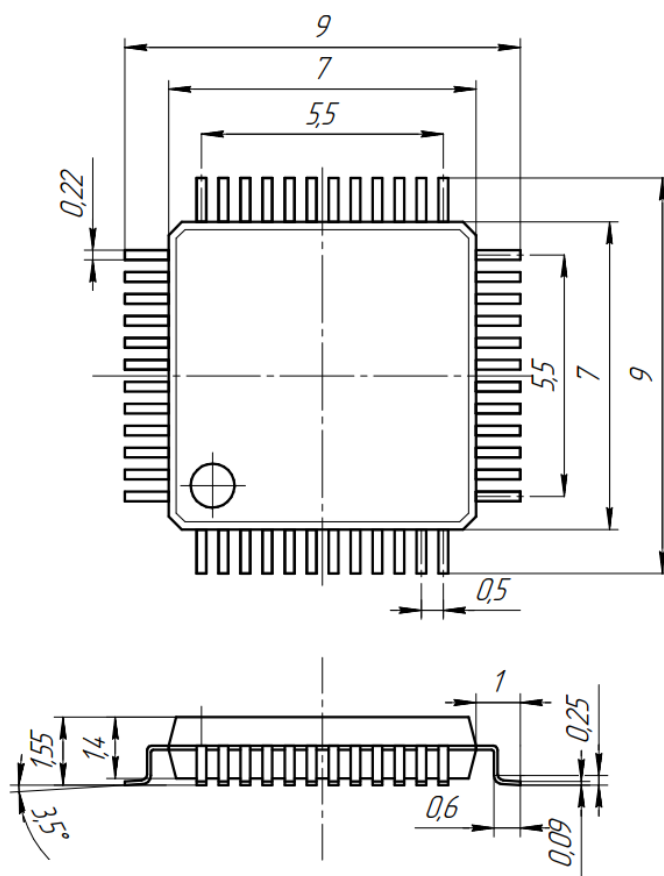


Рис. 2.4. Креслення мікроконтролерів STM32F103C8T6 та STM32F411CEU6

					ПК7105.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

2.3. Вибір магніторезисторного датчика

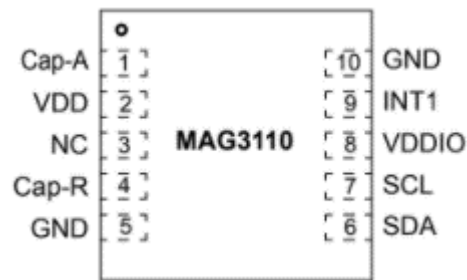


Рис. 2.5. Найменування виводів магніторезисторного датчика MAG3110

В якості магніторезистивного датчика використовується модуль на основі магнітметра MAG3110, який включає в себе 3 магніторезистора різної орієнтації. Модуль володіє дуже високою чутливістю, що дозволяє вимірювати зміни напруженості навіть в умовах намагнічування від магнітного поля Землі. Крім того, датчик надає доступ до інтерфейсу I2C, що робить можливим розширення приладу до системи з багатьох магніторезисторів.

Модуль оперує на тих же напругах, що і мікроконтролер і надає високу частоту збору даних.

За замовчуванням, I2C адреса датчика – 0x0E

Призначення ніжок наступне:

Cap-A	Байпас конденсатор для внутрішньої регуляції
Cap-R	Конденсатор для імпульсу скидання
SDA	Лінія даних I2C
SCL	Лінія тактування I2C
VDDIO	Живлення для буферів
INT1	Переривання

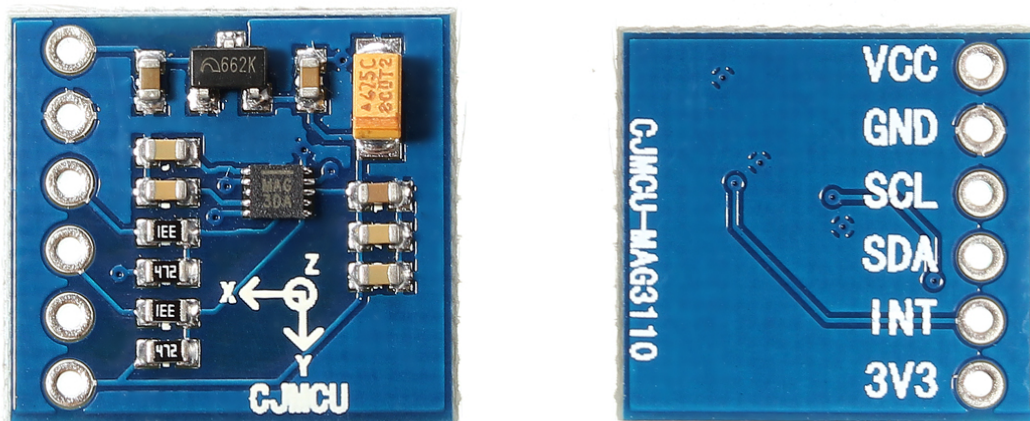


Рис. 2.6. Модуль на базі магніторезисторного датчика MAG3110

Характеристики датчика та модуля наведені нижче:

Динамічний діапазон	± 1000 мкТл
Шум	0.05 – 0.14 мкТл (залежно від частоти збору)
Частота I2C	До 400 кГц
Частота збору даних	До 80 Гц
Напруга живлення	1.95 – 3.6 В
Чутливість	0.1 мкТл
Діапазон робочих температур	-40°C..+85°C
Кількість ніжок датчика	10
Кількість ніжок модуля	6
Розміри датчика	2×2 мм
Розміри модуля	16×17 мм
Частота перетворення АЦП	До 1280 Гц
Розрядність АЦП	16 біт

Перевагами цього модуля є:

- Висока точність
- Низьке значення шуму

- Низьке енергоспоживання
- Широкий діапазон напруг
- Дуже малі розміри датчика
- Наявність інтерфейсу I2C
- Висока частота збору даних, з чого виходить висока швидкість
- Широкий діапазон робочих температур, за невисокої температурної залежності
- Створений для роботи в якості периферії

Модуль має широкий спектр застосувань і за межами дефектоскопії, головними з яких є точна навігація та орієнтація в портативних приладах.

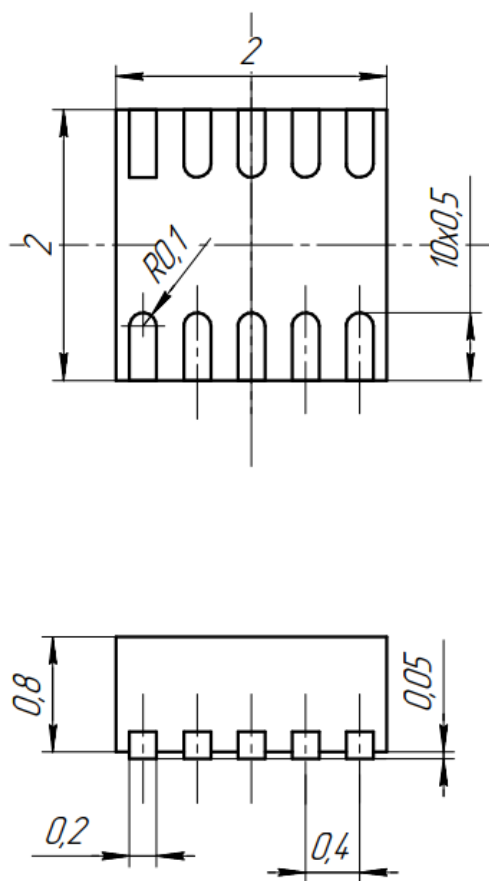


Рис. 2.7. Креслення магніторезистивного датчика

					ПК7105.0000.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

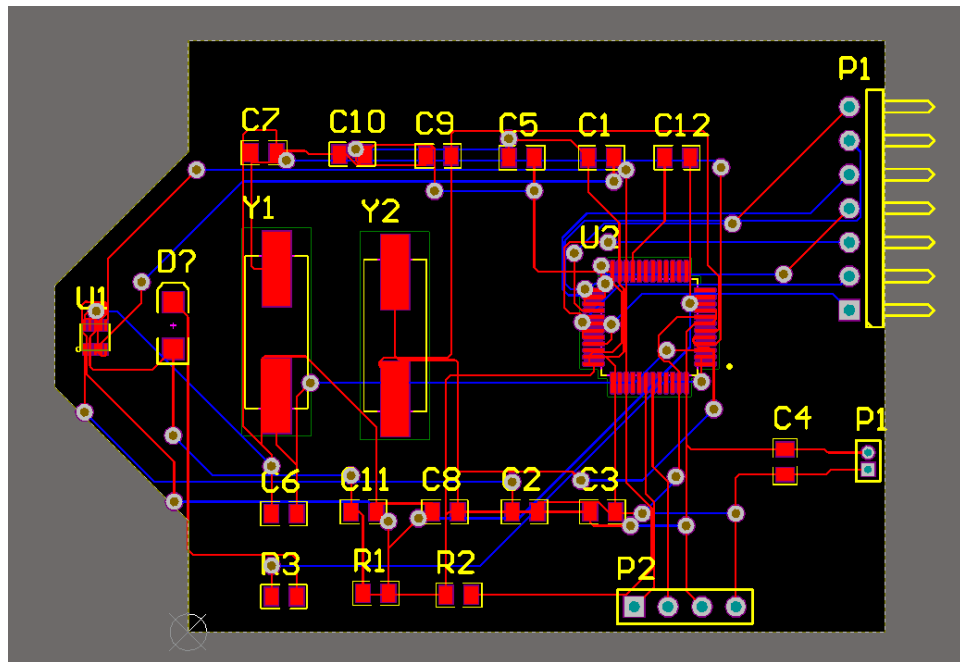


Рис. 2.8. Плата зпроектована в середовищі Altium Designer

Висновок до розділу

В даному розділі були обґрунтовані вибори мікропроцесору та магніторезисторного датчика. Обраний мікропроцесор надає можливість скласти матрицю з магніторезистивних елементів, яка завдяки трьом встановленим інтерфейсам I2C може складатися з майже 400 елементів. А завдяки розмірам обраного датчика вимірювання кожного буде дуже точним та майже точковим. Завдяки додатковим інтерфейсам мікроконтролеру STM32F411CEU6 можливо включити дистанційну передачу даних через протокол USART та додаткову периферію.

					ПК7105.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Розділ 3. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

3.1. Розрахунок поля розсіювання дефекту

Розглянемо можливість проведення контролю обраним магніторезисторним датчиком без намагнічування ОК.

Нехай дефект-тріщина володіє наступними характеристиками:

Ширина розкриву $S - 0.1$ мм

Глибина тріщини $T - 0.5$ мм

Як видно з мапи магнітного поля землі (рис. 3.1) – в північній півкулі індуктивність магнітного поля зазвичай досягає 50 мкТл.

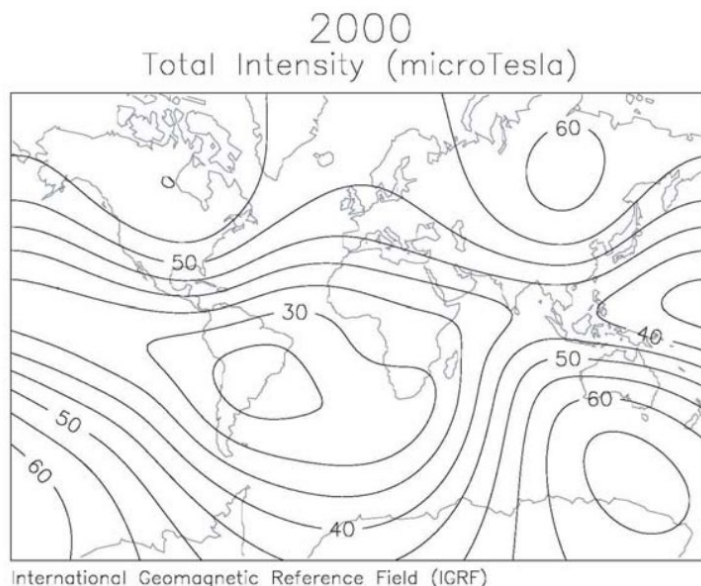


Рис. 3.1. Мапа інтенсивності магнітного поля землі

Магнітна проникність повітря приблизно дорівнює абсолютній магнітній проникності тому можемо використати наступну залежність для розрахунку напруженості магнітного поля:

$$H = \frac{1}{\mu_0} B = \frac{1}{4\pi * 10^{-7}} 50 * 10^{-6} = 39.8 \frac{A}{m} \quad (3.1)$$

					ПК7105.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Розрахуємо напруженість магнітного поля на відстані 0.5 мм:

$$H_n = H \frac{S}{\pi} \left(\frac{x}{x^2 + y^2} - \frac{x}{x^2 + (y + T)^2} \right) =$$

$$= \frac{3.98}{\pi} \left(\frac{x}{x^2 + 0.5^2} - \frac{x}{x^2 + (0.5 + 0.5)^2} \right) \quad (3.2)$$

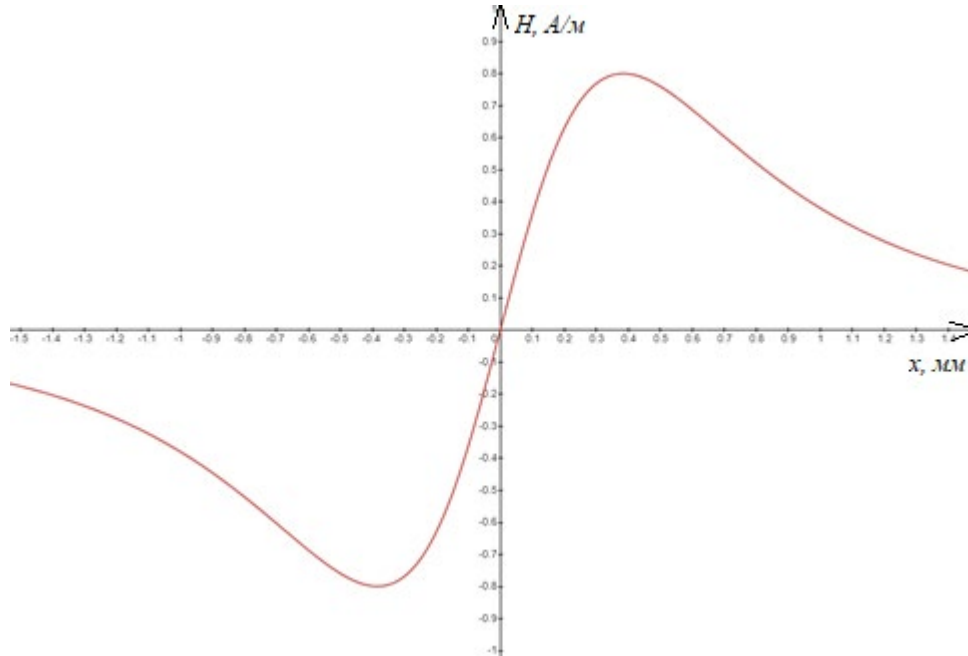


Рис. 3.2. Графік напруженості поля розсіювання дефекту

З графіку (рис. 3.2) бачимо, що максимальне поле розсіювання дефекту – 0.8 А/м, що відповідає індукції 1 мкТл. Чутливість магніторезисторного датчика складає 0.1 мкТл, тому можливо зафіксувати дефект навіть без намагнічування.

3.2. Розрахунок частоти передачі даних інтерфейсом І2С

Перш за все, розрахуємо напруги високого та низького цифрових рівнів. За документацією на магніторезисторний датчик MAG3110 – напруга високого рівня складає 75% від напруги живлення, а низького – 30%:

$$V_H = 0.75 * V_{ddio} = 0.75 * 3.3 = 2.475 \text{ В}$$

$$V_L = 0.3 * V_{ddio} = 0.3 * 3.3 = 0.99 \text{ В}$$

					ПК7105.0000.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Частота лінії тактування інтерфейсу I2C може значно перевищувати
 Час, який займає наростання імпульсу до значення високого рівня на лініях
 SDA та SCL:

$$V_H = V_{ddio} \left(1 - e^{-\frac{t_H}{\tau}}\right) \quad (3.3)$$

$$e^{-\frac{t_H}{\tau}} = \frac{V_{ddio} - V_H}{V_{ddio}}$$

$$\frac{t_H}{R_{\Pi} C_{\text{ш}}} = -\ln\left(\frac{V_{ddio} - V_H}{V_{ddio}}\right)$$

$$t_H = R_{\Pi} C_{\text{ш}} \ln\left(\frac{V_{ddio}}{V_{ddio} - V_H}\right),$$

де R_{Π} – опір резистора підтягування, $C_{\text{ш}}$ – сумарна ємність шини

Так само час, який займає наростання імпульсу до значення низького рівня:

$$t_L = R_{\Pi} C_{\text{ш}} \ln\left(\frac{V_{ddio}}{V_{ddio} - V_L}\right) \quad (3.4)$$

Виведемо формулу для розрахунку часу необхідного для спаду напруги до
 мінімального значення високого логічного рівня:

$$V_H = V_{ddio} e^{-\frac{t_{H1}}{\tau}} \quad (3.5)$$

$$e^{-\frac{t_{H1}}{\tau}} = \frac{V_H}{V_{ddio}}$$

$$\frac{t_{H1}}{R_{\Pi} C_{\text{ш}}} = -\ln\left(\frac{V_H}{V_{ddio}}\right)$$

$$t_{H1} = R_{\Pi} C_{\text{ш}} \ln\left(\frac{V_{ddio}}{V_H}\right)$$

Так само час необхідний для спаду до низького рівня:

$$t_{L1} = R_{\Pi} C_{\text{ш}} \ln\left(\frac{V_{ddio}}{V_L}\right) \quad (3.6)$$

Оберемо додаткову ємність на основі необхідності забезпечення частоти
 400 кГц.

$$T_{SCL} = \frac{1}{f_{SCL}} = \frac{1}{400\,000} = 2.5 \text{ мкс} \quad (3.7)$$

					ПК7105.0000.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Стандартним часом утримання високого рівня на лінії SCL в швидкому режимі є значення 0.6 мкс. Низького рівня – 1.3 мкс (рис. 3.3).

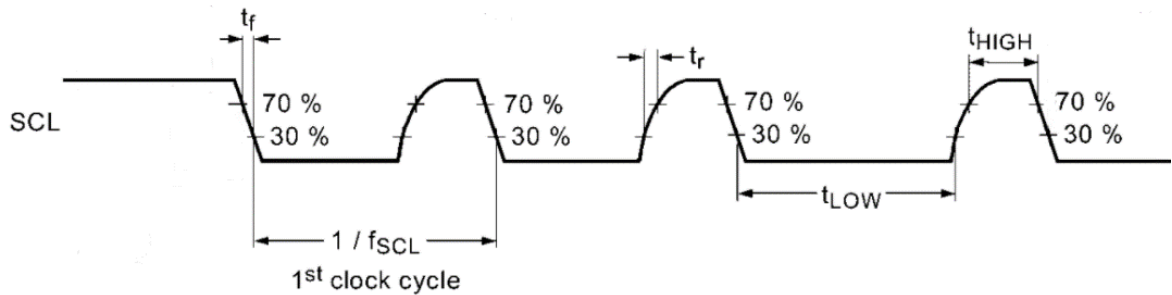


Рисунок 3.3. Часова діаграма лінії тактування. t_f – час зміни стану заднього фронту; t_r – час зміни стану переднього фронту; t_{LOW} – час утримання низького рівня; t_{HIGH} – час утримання високого рівня; f_{SCL} – частота тактуючого сигналу.

Таким чином сумарний час переходу між логічними рівнями має складати:

$$t_{H-L} + t_{L1-H1} = 2.5 - 0.6 - 1.3 = 0.6 \text{ мкс (3.8)}$$

Тобто:

$$R_{\Pi} C_{\Pi} \left(\ln \left(\frac{V_{ddio}}{V_{ddio} - V_H} \right) - \ln \left(\frac{V_{ddio}}{V_{ddio} - V_L} \right) + \ln \left(\frac{V_{ddio}}{V_L} \right) - \ln \left(\frac{V_{ddio}}{V_H} \right) \right) = 0.6 \text{ мкс (3.9)}$$

$$R_{\Pi} C_{\Pi} \left(\ln \left(\frac{V_{ddio} - V_L}{V_{ddio} - V_H} \right) + \ln \left(\frac{V_H}{V_L} \right) \right) = 0.6 \text{ мкс}$$

$$R_{\Pi} C_{\Pi} = \frac{0.6 * 10^{-6}}{\ln \left(\frac{3.3 - 0.99}{3.3 - 2.475} \right) + \ln \left(\frac{2.475}{0.99} \right)} = 3.083 * 10^{-7}$$

Прийmemo паразитні ємності провідника та датчика за 25 пФ, беручи до уваги те, що максимальна ємність встановлена на шині не може перевищувати 400 пФ, та наявність вмонтованих підтягуючих резисторів номіналом 4.7 кОм на модулі, оптимальною додатковою ємністю буде:

$$C_{\Pi} = \frac{3.083 * 10^{-7}}{4700} - 25 * 10^{-12} \approx 40 \text{ пФ}$$

					ПК7105.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

3.3. Розрахунок часу збору та зчитування даних

Розрахуємо час необхідний для передачі 16 бітів інформації по кожній з складових магнітного поля в швидкому режимі. Швидкий режим має в основі стандартну частоту тактування – 400 кГц.

Сумарна кількість бітів даних – $16 * 3$ (кількість складових) = 48 бітів.

Передача бітів, як вже було зазначено, здійснюється з частотою 400 кГц, тобто передача одного біту займає 2.5 мкс.

Під час передачі даних виконуються наступні операції:

1. Старт-послідовність, що потребує затримки 0.6 мкс (та додатково час переходів між рівнями). $t_{START} = 0.6 + 0.6 = 1.2$ мкс.
2. Передача бітів інформації про підлеглого – адреси, зчитування/запису, підтвердження (в сумі 9 бітів) складає в загальному: $t_{ADDR} = 2.5 * 9 = 22.5$ мкс.
3. Далі відбувається вибір реєстру для зчитування. Наявні 6 реєстрів даних (по 2 реєстри на кожен складову). Як і у минулому випадку ця операція використовує 9 бітів. $t_{REG} = 2.5 * 9 = 22.5$ мкс.
4. Відбувається повторний старт з вибором режиму зчитування. Старт займає час t_{START} , вибір нової конфігурації адреси – t_{ADDR} .
5. Отримання 8 бітів даних та біту підтвердження. $t_{DATA} = 9 * 2.5 = 22.5$ мкс

Для отримання всіх даних послідовність повторюється 6 разів.

$$T_D = 6 * (2 * t_{START} + 2 * t_{ADDR} + t_{REG} + t_{DATA}) \quad (3.10)$$

$$T_D = 6 * (2 * 1.2 + 2 * 22.5 + 22.5 + 22.5) = 554.4 \text{ мкс}$$

Магніторезисторний датчик MAG3110 записує значення до регістрів з частотою 80 Гц, що відповідає 12.5 мс часу.

Таким чином оновлення даних на мікроконтролері відбувається кожні 13.0544 мс (76.6 Гц).

У випадку якщо датчиків буде декілька – оновлення даних буде тривати:

					ПК7105.0000.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$t_{\text{пр}} = \frac{1}{f_{\text{DATA}}} + T_D * N \quad (3.11), \text{ де } N - \text{кількість датчиків.}$$

3.4. Розрахунок параметрів АЦП

При розрахунку частоти АЦП порозрядного наближення перш за все необхідно визначити його розрядність.

Магніторезистивний датчик MAG3110 може вимірювати індукцію магнітного поля в проміжку від -1000 мкТл до +1000 мкТл, тобто має динамічний діапазон 2000 мкТл.

Чутливість датчика – 0.1 мкТл, таким чином кількість можливих дискретних значень магнітної індукції:

$$\frac{\Delta B}{S} = \frac{2000}{0.1} = 20000 \quad (3.12)$$

Знаходимо мінімальну кількість розрядів для кодування отриманого значення:

$$n = \log_2 20000 = 14.2877 \quad (3.13)$$

Округлюємо в більшу сторону та отримуємо $n=15$.

Проте, варто пам'ятати, що АЦП, зазвичай, згідно стандартів випускають розрядністю 12, 14, 16 і т.п. біт. Через це – $n=16$.

З документації на зазначений магніторезистивний датчик відомо, що частота перетворення встановленого АЦП може сягати 1.28 кГц.

Процес перетворення АЦП потребує отримання 18 імпульсів на кожному складову – сигналу СТАРТ та СТОП та 16 імпульсів квантування.

Отже, можливо розрахувати частоту тактування АЦП:

$$f_T = f_d * (n + 2) = 1280 * 18 = 23.04 \text{ кГц} \quad (3.14)$$

АЦП порозрядного наближення включає в себе схему вибірки-збереження, яка утримує вхідне значення на АЦП від його зміни під час перетворення.

Розрахуємо необхідну роздільну здатність по вхідній напрузі для забезпечення вказаної точності:

					ПК7105.0000.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Так як напругу необхідно підтримувати протягом всього часу дискретизації (після приходу СТАРТ до квантування останнього біта) – розрахуємо цей час:

$$t_d = \frac{1}{f_T} * (n + 1) = \frac{1}{23040} * 17 = 0.74 \text{ мс} \quad (3.15)$$

Визначимо максимальну допустиму зміну напруги на схемі вибірки-збереження АЦП, за якої результат цифрування не буде змінений:

$$\gamma_D = \frac{1}{2^n} = \frac{1}{2^{16}} = 1.526 * 10^{-5} \quad (3.16)$$

Беручи до уваги характеристики схеми вибірки-збереження АЦП, а саме ємність – 1 нФ та опір 10 ГОм, можна розрахувати величину розряду схеми та визначити похибку:

$$V_p = V_{dd} * e^{\frac{-t_d}{R_{вз} C_{вз}}} = 3 * e^{\frac{0.74 * 10^{-3}}{10 * 10^9 * 1 * 10^{-9}}} = 2.999778 \text{ В} \quad (3.17)$$

$$\gamma = \frac{V_{dd} - V_p}{V_{dd}} = 7.4 * 10^{-5} \quad (3.18)$$

Таким чином, $\gamma < \gamma_D$, тому значення спотворене в результаті розряду схеми вибірки-збереження не буде.

Висновок до розділу

В розділі 3 був проведений розрахунок характеристик магніторезисторного датчика. Перш за все, була розглянута можливість проведення контролю без намагнічування, що було досягнуто в результаті розрахунку характеристик поля розсіювання навколо тріщини заданого розміру. В результаті оцінки швидкості передачі даних можна зробити висновок, що поєднання великої кількості датчиків (127) одним інтерфейсом I2C призведе до додаткової затримки усього в 70 мс. При цьому завдяки наявності декількох інтерфейсів I2C мікроконтролера можливо розподілити управління на декілька паралельних процесів та зменшити затримку ще більше або збільшити розмір матриці без шкоди швидкодії.

					ПК7105.0000.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновок

В даній роботі був спроектований магнітний дефектоскоп, в основі якого лежить процес вимірювання магнітного поля розсіювання дефекту за допомогою магніторезисторів.

В першому розділі були проаналізовані магніторезисторний вид контролю, його фізичні особливості та області застосування. Була приділена увага фізичним особливостям, що лежать в основі обраного методу контролю. Проаналізовані переваги та недоліки перед іншими видами магнітного контролю.

Обраний в другому розділі магніторезисторний датчик володіє інтерфейсом I2C, який, як було розглянуто в аналітичному огляді, дозволяє поєднувати велику кількість периферійних пристроїв без значного технологічного ускладнення або значних падінь показників швидкодії. Поєднання великої кількості магніторезисторних датчиків може розширити область застосування приладу та значно прискорити сканування поверхні. Розміри датчика надають можливість проводити точковий контроль з дуже високою точністю.

Завдяки обраному мікроконтролеру дані отримані з датчика можна візуалізувати на периферії, зберігати в пам'яті та передавати на інші прилади, через що технологічний процес буде займати набагато менше часу та може бути автоматизованим (на відміну від магнітопорошкового метода), чим також підвищить точність та виключить людську похибку.

Проведений в третьому розділі розрахунок довів можливість проведення контролю в умовах відсутності зовнішнього намагнічування. Розрахунок швидкості передачі даних дав можливість оцінити тривалість збору інформації з великої кількості датчиків та дав оцінку швидкодії обраного типу датчика.

					ПК7105.0000.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список використаних джерел

[1]. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. Под общ. ред. В.В.Клюева. Т 2: В 2 кн. – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с: ил. Вихретоковый контроль. Книга 2 / Ю.К.Федосенко, В.Г.Герасимов, А.Д. Покровский, Ю.Я.Останин.

[2]. Возможность использования магниторезистивных преобразователей в инклинометрии / О. В. Фадеева // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д. : ПГАСА, 2013. – № 6. – С. 13 – 18. – рис. 5. – табл. 1. – Библиогр.: (8 назв.).

[3]. Магнітний неруйнівний контроль: Навчальний посібник / Ю.В. Куц, А.Г. Протасов, В.К. Цапенко, В.С. Єременко, Ю.Ю. Лисенко, К: НТУУ "КПІ". – 2012. – 139 с.

[4]. Технології електромагнітного неруйнівного контролю. Лабораторний практикум [Електронний ресурс] / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 63 с.

[5]. Магнитодиоды, магнитотранзисторы и их применение / Егиазарян Г. А., Стафеев В. И. – М.: Радио и связь, 1987. – 88 с.: ил. – (Массовая б-ка инженера «Электроника»).

[6]. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – Москва: Наука, 1968. – 940 с. – (4).

[7]. Средства измерений параметров магнитного поля / Ю. В. Афанасьев, Н. В. Студенцов, В. Н. Хорев, Е. Н. Чечурина, А. П. Щелкин. – Л.: Энергия. Ленингр. Отд-ние, 1979. – 320 с., ил.

[8]. Кобус А. Датчики Холла и магниторезисторы. Перевод с польского В. И. Тихонова и К. Б. Макидонской, под редакцией О. К. Хомерики / А. Кобус, Я. Тушинский. – Москва: Энергия, 1971. – 352 с.

[9]. Бараночников М. Л. Б24 Микромагнитоэлектроника. Т. 1. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 544 с.: ил.

					ПК7105.0000.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

[10]. Електричний, магнітний та електромагнітний види контролю: навчальний посібник / О. Є. Середюк, О. Б. Барна, О. С. Криницький – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2017. – 330 с.

[11]. Мікропроцесорна техніка: лабораторний практикум. Частина 2. [Електронний ресурс] / А. С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 76 с.

[12]. Мікропроцесорна техніка: лабораторний практикум. Частина 1. [Електронний ресурс] / А. С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 113 с.

[13]. V. Bazhenov, A. Protasov and K. Gloinik, "Increasing of operation speed of digital eddy current defectoscopes based on frequency synthesizer," *2017 IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS)*, 2017, pp. 155-158

[14]. H. Bohdan, V. Bazhenov and A. Protasov, "Development of a discrete orthogonal method for determining the phase shift between high-frequency radio impulse signals," *2017 IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS)*, 2017, pp. 191-194

[15]. Баженов В.Г. Оптимизация алгоритмов работы вихретоковых дефектоскопов с использованием микроконтроллеров / В.Г. Баженов, К.А. Гльойник, Ю.Ю. Лысенко // Научные известия, – №1/216, – 2017. – С.118-120.

					ПК7105.0000.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		