

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронна та біомедична інженерія
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

ЗАСТОСУВАННЯ ДИФЕРЕНЦІЙНИХ МАГНІТНИХ СЕНСОРІВ
(тема)

Виконав:
студент 4 курсу, групи ЕЕПС-21-1
Лебідь Д.О.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 171 Електроніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Електронні пристрої та системи
(повна назва освітньої програми)

Керівник Карнаушенко В.П.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет ЕЛБІ

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 171 Електроніка
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Електронні пристрої та системи
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«___» _____ 20___ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Лебідь Данилу Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Застосування диференційних магнітних сенсорів

затверджена наказом університету від 25 05 2025 р. № 415Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 9 06 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи роботи напруга живлення 6 В; діапазон робочих температур - 50+125 град.; середній струм споживання 50 мА; діапазон вимірювання 0...2БТл

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:

1) Аналітичний огляд

2) Створення проекту за допомогою САПР

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) _____

Схеми: схема електрична принципова; _____

Кресленики: схема електрична, складальне креслення, креслення друкованої плати.

Слайди: 12 одиниць _____

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни	Примітка
1	Отримання завдання	25.04.2025	
2	Огляд інформаційних джерел	25.04-30.05	
3	Створення проекту за допомогою САПР	01.05-15.05	
4	Пояснювальна записка	21.05-05.06	
5	Підготовка презентації	04.05-10.05	
6	Рецензування, нормо контроль	7.06-10.06	
7	Здача роботи на кафедрі	10.06.2025	

Дата видачі завдання 25 04 2025 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ ВПК _____ Карнаушенко В.П. _____
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи складає: 32 сторінки, 11 рисунків, 8 джерел, 4 додатків.

СЕНСОР, МАГНІТНЕ ПОЛЕ, ВИМІРЮВАННЯ, СХЕМА

Об'єкт дослідження – диференційні магнітні сенсори.

Мета роботи – дослідження принципів роботи та можливостей застосування диференціальних магнітних сенсорів у сучасних системах контролю.

Метод – аналітичний.

Актуальність: зростаюча потреба в точному та надійному вимірюванні магнітних полів у різних галузях техніки зумовлює активне використання диференціальних магнітних сенсорів. Їх висока чутливість, стійкість до завад і здатність працювати в складних умовах роблять такі сенсори актуальними для сучасних автоматизованих систем, зокрема в автомобілебудуванні, медицині та робототехніці.

ABSTRACT

The explanatory note to the qualification work consists of: 32 pages, 11 figures, 8 sources, 4 appendices.

SENSOR, MAGNETIC FIELD, MEASUREMENT, SCHEME

The object of the study is differential magnetic sensors.

The purpose of the work is to study the principles of operation and the possibilities of applying differential magnetic sensors in modern control systems.

The method is analytical.

Relevance: the growing need for accurate and reliable measurement of magnetic fields in various fields of technology leads to the active use of differential magnetic sensors. Their high sensitivity, resistance to interference and ability to work in difficult conditions make such sensors relevant for modern automated systems, in particular in automotive engineering, medicine and robotics.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	8
1.1 Застосування магнітних сенсорів в транспортних системах	12
1.2 Новітні технології розвитку магнітних вимірювань	13
2 ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА МАГНІТНИХ СЕНСОРІВ	15
2.1 Порівняння технологій TMR, AMR, GMR	16
3 КОМПОНЕНТНА БАЗА МАГНІТНИХ СЕНСОРІВ	21
3.1 Датчики кутового положення	25
4 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ	28
ВИСНОВКИ.....	31
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	32
ДОДАТКИ	33

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

IC – інтегральна схема

ABS – антиблокувальна система гальмування

ADAS – системи допомоги водієві

AMR – явище анізотропного магніторезистивного ефекту

ASIL-D – найвищий рівень функціональної безпеки в автомобільній галузі

BLDC – безщітковий постійнострумовий двигун

BMS – система управління батареєю

CMOS – магнітні датчики ефекту Холла

EMI – електромагнітні завади

EPS – електричний підсилювач керма

GMR – явище гігантського магніторезистивного ефекту

MCS – магнітний датчик струму

SPI – послідовний інтерфейс зв'язку

TMR – тунельні магніторезистивні сенсори

TMP – датчик температури

ВСТУП

Магнітне вимірювання має важливе значення в сучасних технологіях, оскільки воно зменшує розмір і вартість, одночасно покращуючи продуктивність у програмах визначення положення та струму. Для визначення положення магнітні датчики забезпечують безконтактні рішення, які зменшують розмір системи, складність і технічне обслуговування, що робить їх ідеальними для таких галузей, як автомобілебудування, робототехніка та промислова автоматизація. Для вимірювання струму магнітні датчики забезпечують безпечні й точні вимірювання з властивою гальванічною розв'язкою, особливо в потужних галузях промисловості, включаючи сонячну енергію, приводи зі змінною швидкістю, а також зарядку електромобілів і керування двигуном.

Оскільки галузі потребують менших, більш точних і стійких до перешкод датчиків, топології диференціального зондування будуть критичними для підвищення точності в середовищах, де блукаючих магнітних полів неможливо уникнути. Компоненти MPS, у тому числі MA900 і MAQ79010FS для визначення положення, використовують диференціальне визначення для підвищення точності та надійності в критичних додатках.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

У таких галузях, як автомобілебудування, робототехніка, аерокосмічна промисловість і охорона здоров'я, дедалі більше вимагають точності датчиків. Точні вимірювання є важливими для безпеки та ефективності, особливо в таких додатках, як електромобілі, де точне визначення струму є життєво важливим для керування батареєю та двигунами. Незначні неточності можуть призвести до неефективності або навіть збоїв системи. У міру того, як системи стають все складнішими, вимоги до точності посилюються – деякі програми вимагають невеликої точності вимірювання кута та точності від 1% до 2% вимірювання струму.

Дотримання цих стандартів є складним завданням, оскільки підвищена чутливість робить датчики більш вразливими до шуму. Ці проблеми вимагають таких методів, як диференціальне зондування, шумозаглушення та покращене екранування. Стабільність температури також має вирішальне значення, оскільки показання датчиків можуть змінюватися зі змінами температури, особливо в автомобільному середовищі. Крім того, оскільки датчики стають меншими для інтеграції компактної системи, датчикам важче підтримувати точність без перешкод. Збалансування високої продуктивності з обмеженнями вартості є ключовим завданням, особливо в побутовій електроніці.

Магнітні датчики схильні до перешкод від природних і штучних зовнішніх магнітних полів. Цей шум може походити навіть від магнітного поля Землі, яке може спотворювати показання у високоточних програмах. Крім того, потік витоку зі статорів двигуна може створювати перешкоди датчикам поблизу, для чого може знадобитися екранування або диференціальне вимірювання. Якщо феромагнітні матеріали знаходяться поблизу датчика, вони можуть додатково спотворювати магнітні поля, що може призвести до неточних вимірювань.

Інші джерела перешкод включають магнітні поля, створені струмопровідними компонентами, такими як котушки індуктивності та трансформатори, особливо в системах із сильним струмом. У багатофазних електродвигунах сусідні фазні цільові магніти можуть заважати один одному, створюючи шум і ускладнюючи визначення положення.

Диференціальне зондування підвищує точність магнітного датчика шляхом усунення синфазних перешкод, що робить цю топологію ефективною в середовищах із значними зовнішніми магнітними полями та шумом. Ця конструкція використовує два або більше чутливих елементів, таких як пласкі комірки Холла або елементи TMR (Tunnel magnetoresistive, тунельні магніторезистивні), для вимірювання магнітних полів у різних точках, усуваючи перешкоди від зовнішніх джерел (наприклад, двигунів або полів розсіювання), зосереджуючись виключно на цільовому сигналі. Деякі з переваг диференціального датчика включають:

- зменшення шуму усуває зовнішні поля, що однаково впливають на обидва датчики;
- покращена точність сигналу фокусується на цільовому магнітному сигналі для точних вимірювань;
- зменшення інтерференції призводить до підвищеної точності, пропонуючи точні показання в автомобільних і промислових застосуваннях.

Для вимірювання струму два датчики на ефекті Холла, розташовані по обидві сторони провідника зі струмом, виявляють магнітне поле, пригнічуючи зовнішній шум. Це забезпечує точні вимірювання струму, особливо в шумному середовищі (наприклад, акумуляторні системи електромобілів або керування двигуном), а також підвищує ефективність і безпеку.

У датчиках положення також використовується диференціальна топологія, яка порівнює магнітні поля в різних точках для фільтрації перешкод. Однак це вимагає вирівнювання по осі з цільовим магнітом, оскільки позаосьові магніти розглядаються як поля агресора.

На додаток до методів, наведених вище, кілька осередків Холла можна інтегрувати в один чіп для вимірювання магнітних полів симетрично навколо провідника, підвищуючи точність і дозволяючи датчику ефективно функціонувати в середовищах з високим рівнем електромагнітних перешкод. Комірочки Холла ідеально підходять для застосувань, які вимагають високої точності та надійності.

Топологія диференціального датчика є важливою для точного визначення положення в шумному середовищі. Наприклад, в автомобільному управлінні дросельною заслінкою магнітні датчики положення, що використовують диференціальну топологію, усувають перешкоди від компонентів двигуна або зовнішніх магнітних джерел, забезпечуючи точні показання дросельної заслінки. У системах кермового керування з електричним підсилювачем диференціальні датчики забезпечують точний зворотний зв'язок щодо кутів повороту керма, визначаючи положення магніту на рульовій колонці, і на них не впливає зовнішній шум. Робототехніка також виграє від диференціальних датчиків положення, які точно визначають положення з'єднань або рухомих частин навіть у середовищах із сильними електромагнітними перешкодами. Датчики MPS, такі як MA900 і MAQ79010, використовують цю технологію для забезпечення точного та надійного визначення положення в автомобільних і промислових застосуваннях. На рисунку 1.1 показано типове застосування MA900.

У середовищах із сильним струмом і високим рівнем шуму вимірювання диференціального струму має вирішальне значення. У системах керування батареями (BMS) для електромобілів або систем відновлюваної енергії диференціальні датчики відстежують струм батареї для ефективного управління енергією. У системах керування двигуном ці датчики забезпечують безпечну та ефективну роботу, забезпечуючи точні вимірювання струму, навіть якщо присутній шум від двигуна. Подібним чином у промисловій автоматизації, де великі машини створюють значні електромагнітні перешкоди (EMI), датчики

струму MPS видають точні показники струму, незважаючи на складні умови.

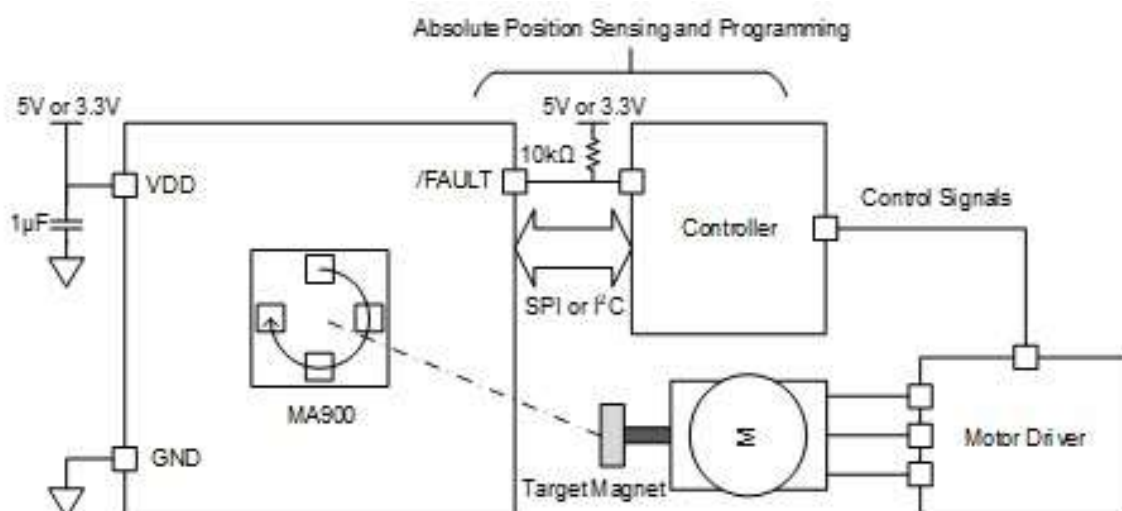


Рисунок 1.1 – Типова схема підключення сенсора магнітного поля MA900

Диференціальне вимірювання положення вимагає точного вирівнювання по осі з цільовим магнітом для точних показань. Поза осьове розміщення може призвести до помилкового тлумачення магнітного поля як перешкоди, що обмежує гнучкість систем зі складним або змінним рухом. Це обмеження вимагає ретельного встановлення, але забезпечує високу точність, що є ключовим у таких додатках, як автомобільне рульове управління та керування дросельною заслінкою.

Нерівномірні магнітні поля (градієнти) можуть спричинити неточності диференціального зондування, оскільки датчики можуть виявляти різну напруженість поля. Щоб пом'якшити це, потрібне обережне розміщення датчика в зонах з мінімальними градієнтами або калібрування системи, особливо в середовищах із кількома магнітами або неоднорідними джерелами.

Розпізнавання диференціального струму не стикається з тими ж компромісами, що й визначення положення, воно лише вимагає більш ретельного попереднього проектування ІС. Він точно виявляє магнітні поля навколо струмопровідних провідників без необхідності спеціального вирівнювання, пропонуючи універсальність і стабільну продуктивність у різних застосуван-

нях.

Ключові фактори включають забезпечення того, щоб датчик відповідав очікуваному діапазону струму, керування термічною стабільністю для запобігання дрейфу та забезпечення достатньої смуги пропускання та часу відгуку для динамічних застосувань, таких як електроприводи.

1.1 Застосування магнітних сенсорів в транспортних системах

Магнітний датчик є ключовим для інновацій у електромобілів і передових системах допомоги водієві (ADAS). Диференціальні датчики підвищують точність і надійність у ряді застосувань:

- для електричного підсилювача рульового керування (EPS) такі датчики, як MA900, вимірюють кути повороту з точністю під градус, щоб забезпечити плавне керування;
- у системах керування батареями (BMS) датчики струму з високою точністю контролюють робочий режим та режим заряджання навіть у шумному середовищі;
- для керування тяговим двигуном датчики диференціального струму забезпечують вимірювання струму в реальному часі для оптимізації ефективності двигуна та безпеки в електромобілів.

Диференційні датчики в автомобільних додатках забезпечують покращений контроль і час роботи батареї, надійну роботу в шумному середовищі та ефективну роботу в режимах низького енергоспоживання, збільшуючи запас ходу EV.

У побутовій електроніці зростає попит на компактні малопотужні датчики, і диференціальні датчики є чудовим рішенням для задоволення цих вимог:

- для ігрових контролерів і джойстиків MA900 забезпечує точний і надійний зворотний зв'язок без рухомих частин;

- для переносних пристроїв, таких як розумні годинники та фітнес-трекери, датчики дозволяють надмалі, малопотужні та точні виявлення руху циферблата;

- у домашній автоматизації датчики використовуються в розумних замках і камерах безпеки для малопотужного точного визначення положення.

Диференційні датчики в споживчих програмах з низьким енергоспоживанням забезпечують енергоефективні датчики, які подовжують термін служби батареї пристрою, компактні форм-фактори, що дозволяють зменшити конструкції в пристроях з обмеженим простором, і довший термін служби через відсутність рухомих частин.

Диференційні датчики забезпечують точність і надійність у складних медичних умовах:

- для апаратів МРТ датчики забезпечують точне визначення струму навіть у сильних магнітних полях;

- для високоточного контролю і моніторингу рухів під час реабілітаційних вправ в медицині;

- для хірургічної робототехніки датчики забезпечують субміліметрову можливість позиціонування з кількома осями в безпосередній близькості.

Диференційні датчики в медицині забезпечують високу точність у критичних середовищах (що важливо для точності МРТ в інтенсивних магнітних полях), підвищену надійність і безпеку для виявлення руху та моніторингу реабілітації, а також довговічність пристрою.

1.2 Новітні технології розвитку магнітних вимірювань

Магнітне зондування швидко розвивається, щоб задовольнити зростаючі вимоги до точності, ефективності та адаптивності в таких галузях, як автомобілебудування, охорона здоров'я та споживча електроніка. Нижче наведено кілька ключових досягнень:

- розробляються нові датчики для виявлення менших змін магнітного поля з більшою точністю, що є критичним для застосування в автономному водінні;
- багато осьові сенсорні датчики, здатні виявляти магнітні поля за кількома осями (X, Y і Z), що створюють більш складні програми, такі як 3D-позиціонування в робототехніці та доповненій реальності (AR).
- нова технологія магнітного датчика, наприклад тунельний магніто-резистивний (TMR) привід, що підвищує точність до нових меж із вищою чутливістю та меншим власним шумом.

2 ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА МАГНІТНИХ СЕНСОРІВ

Тунельна магніто резистивна технологія заснована на квантово-механічному ефекті. У магніто резистивному ефекті (МР) зміна магнітного поля призводить до зміни електричного опору. У результаті магнітне поле та електричну змінну можна виміряти на основі їх співвідношення один з одним. ТМР — це особлива форма МР-технології, у якій так званий тунельний ефект забезпечує набагато більшу зміну опору, щойно прикладається магнітне поле. Як наслідок, датчики ТМР пропонують вищу чутливість і точність.

У сенсорах ТМР пакет магнітного матеріалу розділений посередині електричним ізолятором – так званим тунельним бар'єром. Напрямок намагніченості вільного шару залежить від зовнішнього магнітного поля. Напрямок суцільного шару залишається незмінним. Опір елемента пропорційний відносному куту між вільним і твердим шарами.

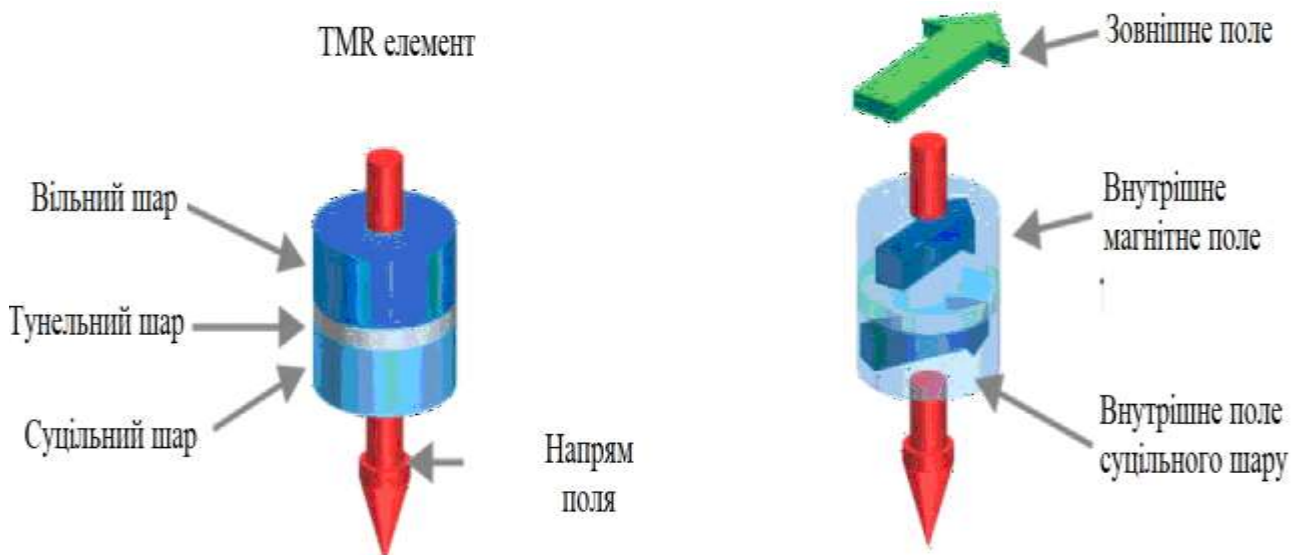


Рисунок 2.1 – Принцип роботи технології ТМР

2.1 Порівняння технологій TMR, AMR, GMR

Сучасні датчики TMR виникли на основі технології AMR (анізотропно-го магніторезистивного) та технології GMR (гігантського магнітного опору), які також були розроблені на початку 1990-х років. Компактні компоненти, засновані на цих технологіях, призвели до впровадження мікроскопічних MR – головок для зчитування на жорсткому диску та відмови від більших електромеханічних головок, що дозволило збільшити щільність зберігання. З подальшим розвитком технології TMR, яка використовує виробничий процес, подібний до CMOS, на кремнієву пластину наносять різні шари та малюють їх. Отже, елементи опору TMR з'єднані послідовно, щоб утворити елемент опору. Ці резистори зазвичай розташовуються групами по чотири, як схема моста Уїтстона. Цей тип з'єднання генерує загальні електричні сигнали в автомобільних технологіях, які можна оцінити безпосередньо або за допомогою спеціалізованої інтегральної електроніки (ASIC IC).

Швидкість зміни опору елемента виражається значенням, яке називається коефіцієнтом MR. Співвідношення MR звичайних елементів AMR і елементів GMR становлять приблизно 3% і 12% відповідно. На відміну від цього, коефіцієнт MR елемента TMR становить 100%. В елементі GMR, у якому немагнітний метал (Cu тощо) знаходиться між двома феромагнітними шарами, перенесення електронів відбувається як електропровідність у металі. З іншого боку, в елементі TMR перенесення електронів відбувається як квантово-механічний тунельний ефект. З цієї причини, коли штифтовий шар і вільний шар знаходяться в протилежному напрямі, елемент TMR має екстремальну характеристику, в якій електрони «майже не можуть рухатися», порівняно з характеристиками GMR, в якому «електронам важко рухатися». рухатися». Це призводить до того, що елемент TMR демонструє надзвичайно

велике співвідношення MR, на додаток до надання характерного характеру його виходу, наприклад «Так чи Ні», або 1/0.

Крім того, це також є причиною того, чому елементи TMR сьогодні використовуються як високочутливі зчитувальні елементи на жорстких дисках. Таким чином, використовуючи ці високочутливі елементи TMR як магнітні датчики, можна отримати надзвичайно великий вихід. Насправді вихідні сигнали датчиків TDK TMR досягають 3000 мВ, що в 20 разів більше, ніж у датчиків AMR, і в 6 разів більше, ніж у датчиків GMR. На рис. 3 представлено порівняння характеристик магнітних датчиків з використанням елемента AMR, елемента GMR та елемента TMR (при напрузі 5 В).

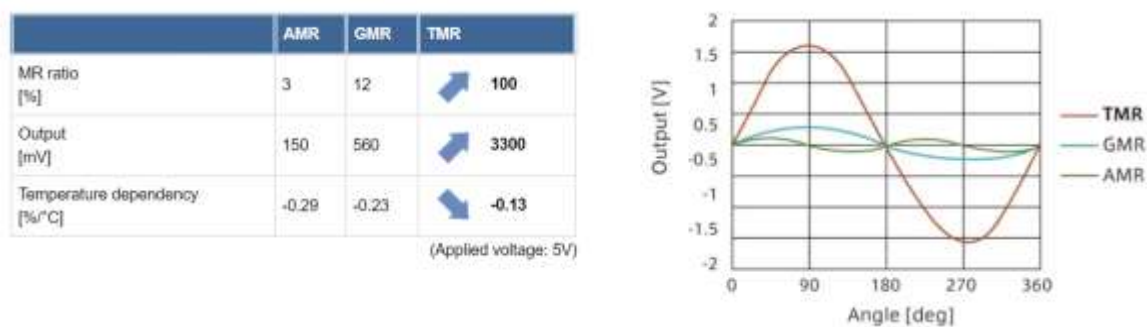


Рисунок 2.2 – Порівняння технологій магнітних сенсорів

Датчики TMS можуть стабільно працювати в широкому діапазоні температур. Через це вони все частіше використовуються як автомобільні компоненти, які вимагають високої точності та надійності. Вони також відрізняються низьким енергоспоживанням і використовуються в широкому діапазоні продуктів на додаток до автомобілів, включаючи споживчі товари, такі як роботи та смартфони.

Ключовим параметром для автомобільних застосувань є вихідна напруга датчика, яку можна зчитувати безпосередньо зі звичайних мікроконтролерів, і, як наслідок, додаткові схеми підсилювача, резистори та конденсатори можуть бути усунені. Датчики кута на основі TMR, датчики швидкості

та лінійні датчики можуть бути використані для реалізації систем гідропідсилювача керма, склоочисників, приводів зчеплення та коробки передач, педаль і дросельних заслінок, а також для багатьох інших застосувань двигуна та положення. Проста конструкція датчика TMP має багато переваг, включаючи більшу надійність, що призводить до кращої функціональної безпеки та чудового моніторингу поведінки датчика під час роботи.

Датчики TMP можна використовувати відповідно до стандарту ISO 26262 до найвищого рівня безпеки (рівень ASIL D) в автомобільній промисловості. Таким чином, вони відповідають стандартам безпеки для встановлення, наприклад, в електропідсилювачі керма та гальм. Іншою важливою особливістю є дуже висока кутова точність, якої можна досягти за допомогою датчиків TMP. Залежно від напруженості магнітного поля, кутова точність до прибл. 0,2 градуса можна досягти протягом терміну служби автомобіля (17 років) і в дозволеному діапазоні температур мікросхем (від -40 °C до 175 °C). Ця продуктивність відображається в підвищенні ефективності та зниженні шуму, особливо для керування електричними безщітковими двигунами постійного струму (BLDC).

Електричні двигуни Положення керма Силовий агрегат Система живлення



Рисунок 2.3 – Застосування магнітних сенсорів на транспорті

Визначаючи, який тип датчика слід використовувати в автомобільних додатках, спеціальні властивості кожного повинні визначати їх використання.

CMOS-сенсори Холла мають економічно ефективний монолітний елемент Холла та інтеграцію передавача на одній мікросхемі. Це робить їх ідеальними для недорогих застосувань або для виявлення сильніших магнітних полів.

У порівнянні з датчиками магнітного поля, заснованими на інших технологіях (Холла/AMP/GMR), датчики ТМР мають краще співвідношення сигнал/шум і мають високу точність і дуже низьке енергоспоживання. Датчики ТМР забезпечують надійну та стабільну роботу в залежності від температури та терміну служби датчиків. Як наслідок, датчикам ТМР надають перевагу в дуже вимогливих додатках.

У багатьох випадках поєднання обох технологій також може бути дуже корисним. Наприклад, у модулі датчика струму датчик ТМР може вимірювати слабкі електричні струми, тоді як датчик Холла виявляє великі струми. Таким чином можна значно розширити діапазон вимірювань із підвищенням точності вимірювань. Другим застосуванням для використання обох технологій є визначення положення ротора в без щітковому електродвигуні. У цьому випадку високоточний датчик ТМР можна поєднати з резервним датчиком Холла для підвищення загальної надійності системи до рівня ASIL-D. У цій програмі не було б потреби в кутовому енкодері.

Незалежно від того, чи використовується датчик Холла, датчик ТМР або обидва, технології в кожному типі датчика можуть зменшити загальну кількість матеріалів і витрати на автомобільну конструкцію порівняно з використанням інших спеціальних датчиків. Краще розуміючи технологію та застосування кожного типу датчика, інженери можуть краще приймати обґрунтовані рішення, що призводить до безпечніших і надійніших конструкцій.

Магнітні датчики використовуються в різноманітних галузях, включаючи транспортні системи, які стають все більш автоматизованими та електрифікованими, промислове обладнання, яке часто використовується в сере-

довищах, схильних до пилу та забруднень, а також споживчі товари, які повинні бути компактними та мати низьке енергоспоживання.

Технології датчиків значною мірою сприяють покращенню паливної ефективності автомобілів. В автомобільному двигуні датчики кута повороту колінчастого валу або датчики кута кулачкового механізму використовуються для отримання інформації в електронний блок керування двигуна для розрахунку оптимального часу та кількості впорскування палива.

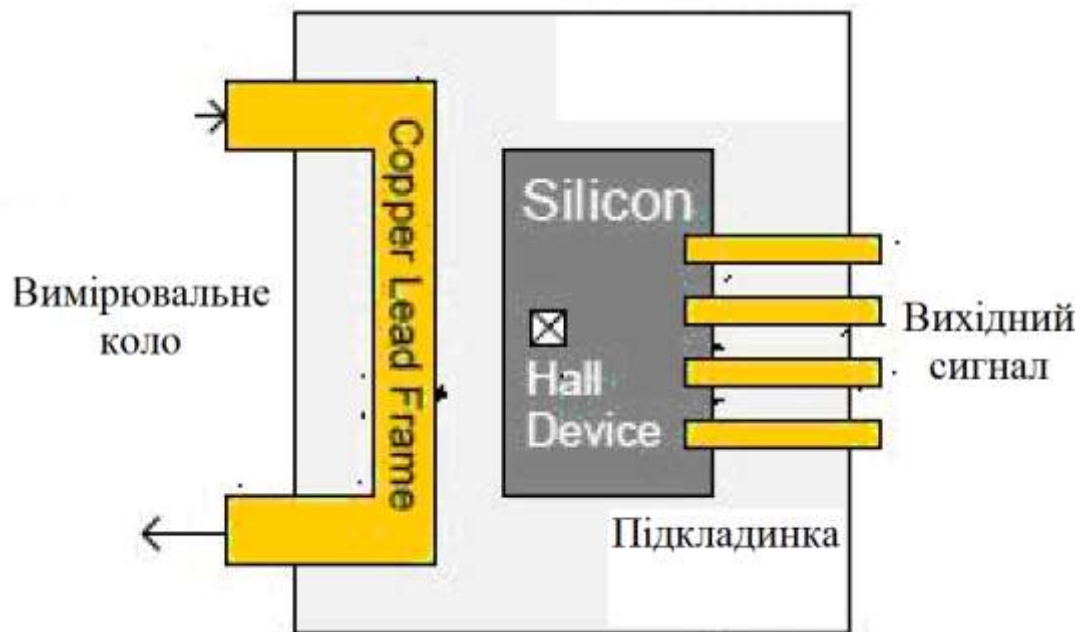
Незважаючи на те, що існують різні типи датчиків кута кривошипу або кута кулачку, магнітні датчики безконтактного типу стали основними через їх несприйнятливості до зносу або пилу. Диск із зубчастою передачею, виготовлений із магнітного матеріалу, поєднано з валом, а магнітний датчик, з додатковим магнітом зміщення, безконтактно розміщено навпроти нього. При запуску двигуна і обертанні зубчастого диску щільність магнітного потоку від магніту змінюється по черзі за рахунок виступів і виїмок зубів шестерні. Магнітний датчик виділяє це як імпульсний сигнал і визначає швидкість обертання на основі кількості імпульсів за одиницю часу. Через цей механізм ці датчики також називаються зубчастими датчиками.

Порівняно з датчиками, що використовують елемент Холла, датчики ТМР відрізняються надзвичайно високою чутливістю та високою продуктивністю, а також реалізують чудові можливості вимірювання як датчики швидкості коліс для систем ABS (антиблокувальної системи гальм). Крім того, можна очікувати, що вони будуть використовуватися як датчики струму, які зберігають енергію, контролюючи зарядку та розрядку акумуляторів.

В останні роки зростає попит на магнітні датчики в таких сферах, як автомобільне електронне обладнання, промислове обладнання та споживча електроніка. Також треба зауважити, що навіть якщо характеристики деяких компонентів дещо гірші, вони можуть бути покращені за рахунок програмного забезпечення.

3 КОМПОНЕНТНА БАЗА МАГНІТНИХ СЕНСОРІВ

Серед сенсорів струму існує багато різноманітних конструкцій безконтактних перетворювачів, а також комбінованих сенсорів, що поєднують холловський датчик з шунтом. Така структура дозволяє отримати як високу чутливість, так і більшу точність вимірювання за рахунок каліброваної відстані до струмопроводу і інтегральної структури. Сімейство датчиків MCS розроблено для вимірювання струму від $\pm 5\text{A}$ до $\pm 250\text{A}$. Первинний струм протікає через мідний каркас і створює магнітне поле в датчиках на ефекті Холла, вбудованих у кремнієву матрицю. Вторинний контур гальванічно ізольований від первинного (рис. 3.1). Датчик генерує вихідний сигнал, пропорційний



первинному струму.

Рисунок 3.1 – Структура датчику струму MCS18xx

Пристрій може витримувати певну силу струму, що перевищує номінальне значення. Однак, навіть якщо опір основного провідника невеликий (близько 1 мОм), тепло може розсіюватися, що може призвести до виходу пристрою з ладу. Можуть виникати різні умови відмови, які залежать від ве-

личини струму, що протікає через первинне коло. Для зменшення залежності від само розігріву датчика застосовано інтегровану схему компенсації із застосуванням платинового термометру опору.

Опір первинного провідника (R_T) лінійно зростає зі збільшенням температури (T). R_T можна обчислити за рівнянням:

$$R_T / R_{25} = 1 + \alpha(T - 25^\circ\text{C})$$

де R_{25} – опір при температурі навколишнього середовища,

$$\alpha — 2,8 \times 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}.$$

Це означає, що постійний струм розсіює тепло з позитивним зворотним зв'язком. Якщо це тепло не може бути достатньо розсіяне, може виникнути тепловий пробій. Це скорочує час до виникнення відмови в залежності від первинного струму.

Якщо температура перевищує температуру плавлення мідної рамки, провідник первинної ланцюга може розплавитися та створити розрив ланцюга. Тепло, вироблене в свинцевій рамі, також поширюється через формувальну масу всередині упаковки та в кремнієву матрицю. Мідна свинцева рама, підкладка та кремнієва матриця мають різні температури руйнування:

- температура плавлення свинцево – мідного каркаса (первинного провідника): 1060°C ;
- точка незворотної деградації матеріалу: приблизно від 260°C до 300°C ;
- абсолютна максимальна температура кремнієвої матриці – 165°C .

Відмова залежить від того, яка з трьох температур деградації досягається першою. Теплова поведінка поточного датчика сімейства MCS180х була досліджена чисельно та експериментально на корпусі SOIC-8.

Як в режимі симуляції, так і в експериментальному режимі MCS180х монтується на оціночній платі із фольгованого стеклотестоліту (рис. 3.2).

Схема з'єднана з контактними майданчиками плати за допомогою планарних виводів.

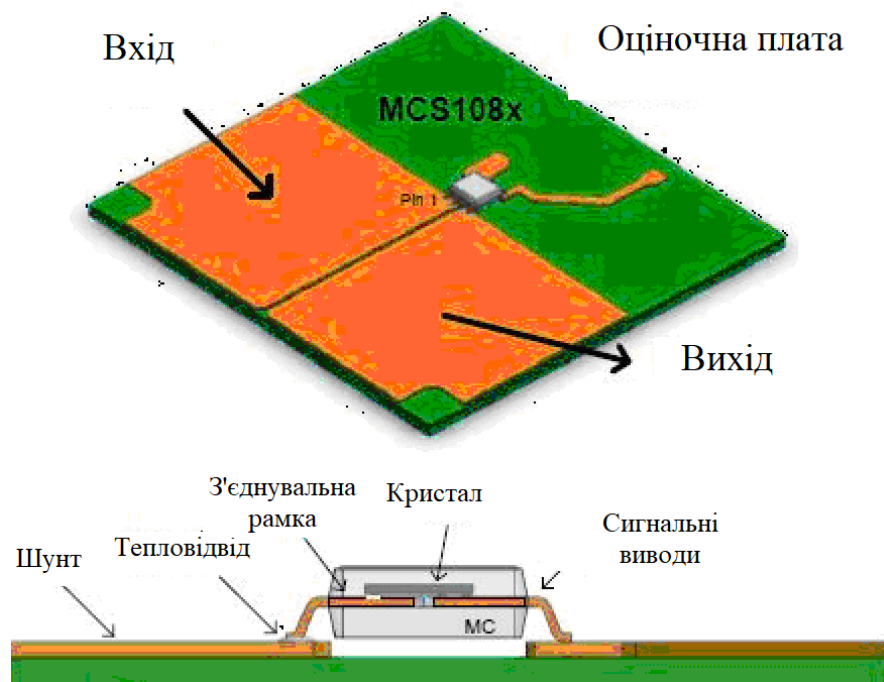


Рисунок 3.2 – Оціночна система на платі, що використовується для дослідження і моделювання робочих характеристик

Температура свинцевої рами швидко зростає при великих струмах. Наприклад, при 350 А мідна свинцева рамка досягає точки плавлення за 10 мс. Оскільки первинний провідник створює розімкнуте коло після того, як він розплавиться, точку руйнування свинцевої рамки можна визначити за допомогою моделювання та експериментів. Однак моделювання показує, що формувальна маса (тонкий шар між свинцевим каркасом і матрицею) досягає точки пошкодження раніше, ніж свинцевий каркас досягає точки плавлення. Навіть якщо немає короткого замикання між первинним і вторинним контурами, характеристики шару ізоляції можуть бути незворотно змінені. Для надійної роботи датчика струму MCS180x має залишатися в діапазоні безпечних.

Для струмів від 250 А до 350 А час до виходу з ладу становить від 10 мс до 200 мс. Механізм поломки також може бути викликаний зоною формувальної суміші, яка знаходиться поблизу первинного провідника, коли вона досягає температури пошкодження. Тому матеріал, що заповнює проміжок між первинним провідником і матрицею, також може бути пошкоджений, що призведе до зменшення ізоляції від первинної до вторинної.

Детальне моделювання розподілу температури всередині рамки з мідного виводу показує, що через 25 мс тепло значно розсіюється вздовж первинного провідника через штифт до друкованої плати. Тому все, що відбувається через 25 мс, залежить від теплового зв'язку MCS180x із друкованою платою. Для струмів нижче 200 А, оскільки збій виникає через 25 мс, умови збою залежать від теплового зв'язку мікросхеми з друкованою платою.

Для струмів від 50 а до 150 а тепла відповідь прогресує, доки температура не стане однаковою в усьому пристрої, досягаючи теплової рівноваги в корпусі. Це означає, що кремнієвий кристал є критичним механізмом поломки, оскільки його абсолютна максимальна температура (165°С) може бути перевищена до того, як інші компоненти упаковки вийдуть з ладу. При 165°С ізоляція ще не змінена, але характеристики датчика можуть назавжди відрізнитися від технічних характеристик.

3.1 Датчики кутового положення

МА600 – це точний магнітний кутовий датчик із високою смугою пропускання, який визначає абсолютне кутове положення постійного магніту, як правило, діаметрально намагніченого циліндра на обертовому валу. Завдяки інтегрованому датчику прецизійного тунельного магнітоопору МА600 забезпечує високу пропускну здатність і високу точність, що робить його ідеальним рішенням для контролю положення та роботизації.

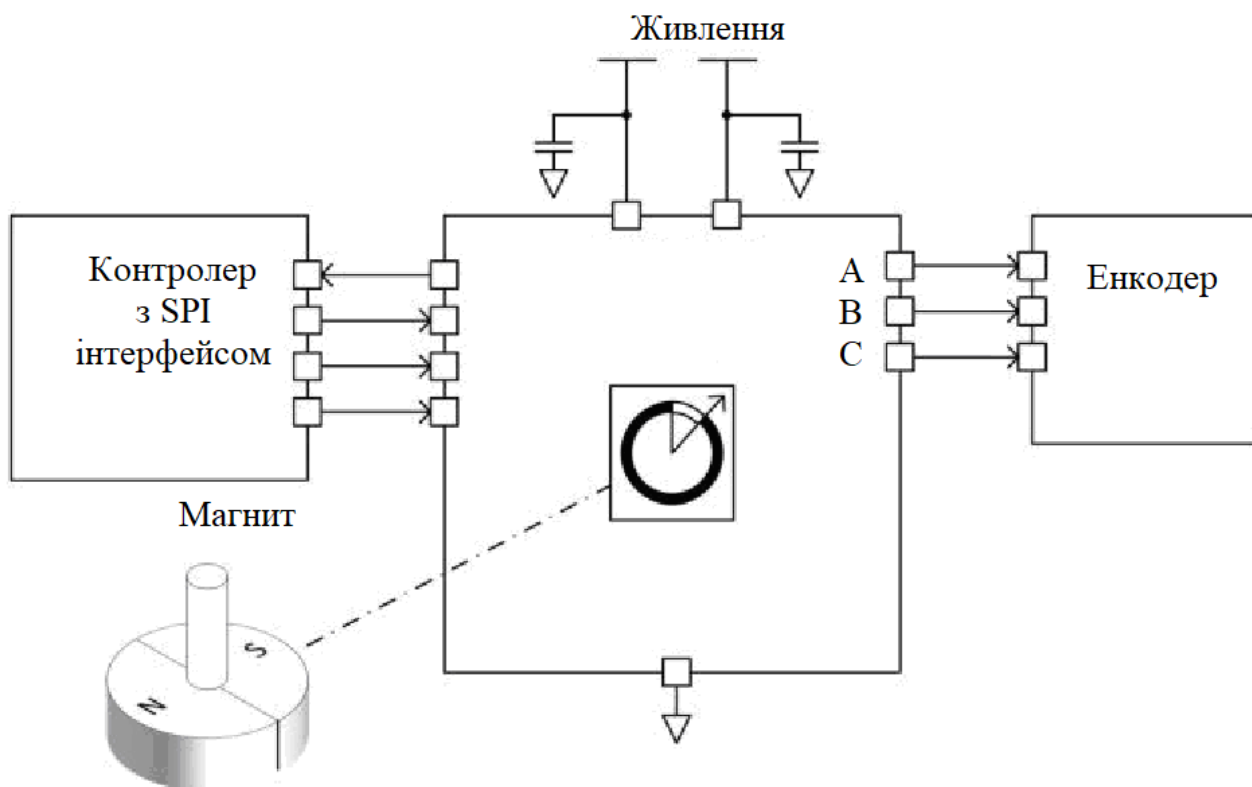


Рисунок 3.2 – Схема підключення датчика кутового положення

МА600 підтримує широкий діапазон напруженості магнітного поля та просторових конфігурацій. Підтримуються конфігурації монтажу на кінці валу (на осі) і на бічному валу (поза осі).

Вбудована енергонезалежна пам'ять забезпечує зберігання параметрів конфігурації, включаючи опорне положення нульового кута, налаштування параметрів положення валу.

МА600 відкалібрований на виробництві для досягнення похибки нижче $0,6^\circ$ у всьому діапазоні робочих температур. Крім того, остаточне калібрування системи доступне через 32-точкову таблицю поправок, яку налаштовує користувач. Результуюча похибка після калібрування користувачем може бути меншою за $0,1^\circ$.

Зв'язок із МА600 можна здійснювати через послідовний периферійний інтерфейс (SPI) і синхронний послідовний інтерфейс (SSI).

МА600 має корпус QFN-16 розміром 3 мм x 3 мм.

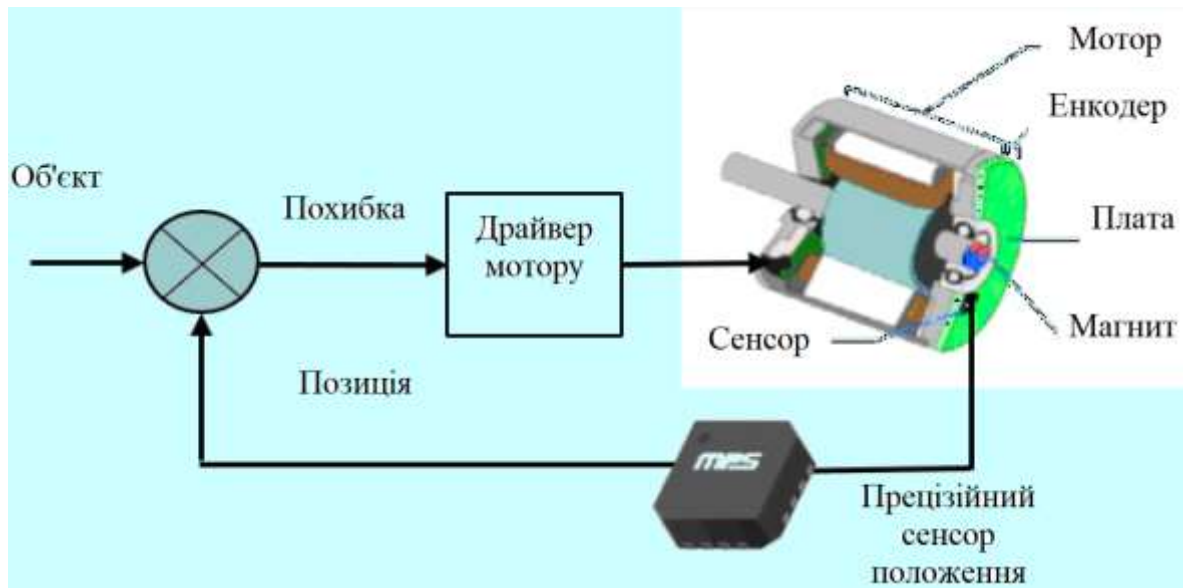


Рисунок 3.3 – Узагальнена схема роботи кутового сенсора

Особливості та характеристики:

- похибка $<0,6^\circ$;
- похибка $<0,1^\circ$ після калібрування користувачем із вбудованою 32-точковою таблицею пошуку;
- конфігурований 12 ... 15 розрядний датчик абсолютного кута;
- висока пропускна здатність (наприклад, 12 кгц при 12,5-бітній роздільній здатності);
- без затримки;
- широкий діапазон магнітного поля від 10 мТл до >100 мТл;
- послідовний периферійний інтерфейс (SPI) для цифрового зчитування кута та конфігурації мікросхеми;
- синхронний послідовний інтерфейс (SSI) для цифрового зчитування кутів;
- інтерфейс інкрементального квадратурного кодера abz із можливістю конфігурації імпульсів на оборот (від 1 до 4096);
- інкрементальний вихід кодера;

- широтно-імпульсна модуляція абсолютний вихід;
- багатооборотний або швидкісний вихід;
- живлення 3,3 В;
- 7,5 мА струм спокою ($i_{avdd} + i_{dvdd}$);
- робоча температура від -40°C до $+125^{\circ}\text{C}$.

4 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ

Розробка будь якого пристрою потребує ретельного аналізу на основі системного підходу, що означає потрібність урахування всіх факторів застосування розробки від енергетичних складових, особливостей зовнішнього середовища, умов експлуатації включно з якісними характеристиками, ергономікою. тощо.

Розробка починається з дослідження економічних, ринкових факторів і після цього починається безпосередньо етапи проектування, першим з яких є створення ескізного проекту і структурної схеми.

Для проекту обрана розробка прототипу системи вимірювання кута повороту для серводвигуна транспортного засобу. Технічне завдання включає основні функції і характеристики системи:

- напруга живлення – 12 вольт;
- кількість точок контролю – 4;
- похибка вимірювання – не більше 1 град.;
- умови використання; температура – 40... +120 град.;
- максимальна частота 12 кГц;
- розрядність – програмована;
- виконання – транспортний рівень.

Структурна схема включає чотири сенсори магнітного поля, що встановлені на різних об'єктах контролю, мікро контролер, виконуючі пристрої – драйвери електродвигунів, інтерфейсні схеми і вторинні джерела живлення, необхідні для роботи електронних схем (рис. 3.1).

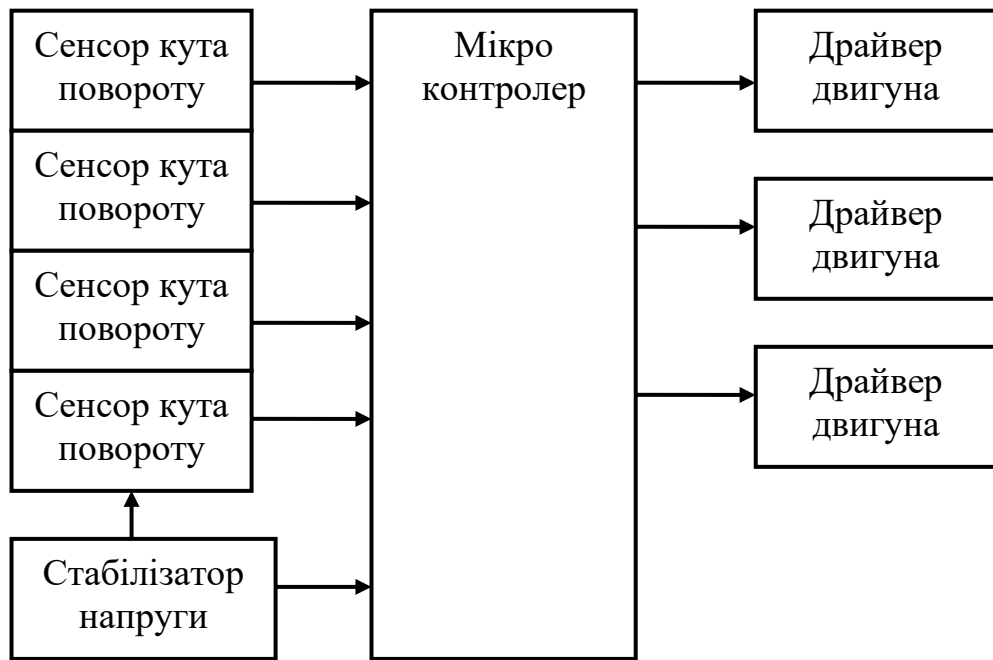


Рисунок 3.1 – Структурна схема прототипу системи вимірювання кута повороту

Наступним етапом є вибір компонентної бази з урахуванням особливостей застосування. Оскільки пристрій призначено для експлуатації в транспортних системах, потрібно звернути увагу на відповідність компонентної бази вимогам існуючих стандартів автомобільної безпеки відповідного рівня.

Таким вимогам мають задовольняти всі компоненти пристрою від роз'ємів до активних компонентів і матеріалів друкованих плат включно з захисним покриттям.

В якості сенсорів кута повороту обрано MA600, характеристики якого наведені в другому розділі. Обчислювально-керуюче ядро на ос нові мікроконтролера STM32 транспортного рівня. Драйвери двигунів VN460 з гальванічною ізоляцією. Роз'єми також з сертифікованої серії.

На основі структурної схеми була побудована схема електрична принципова (рис. 3.2).

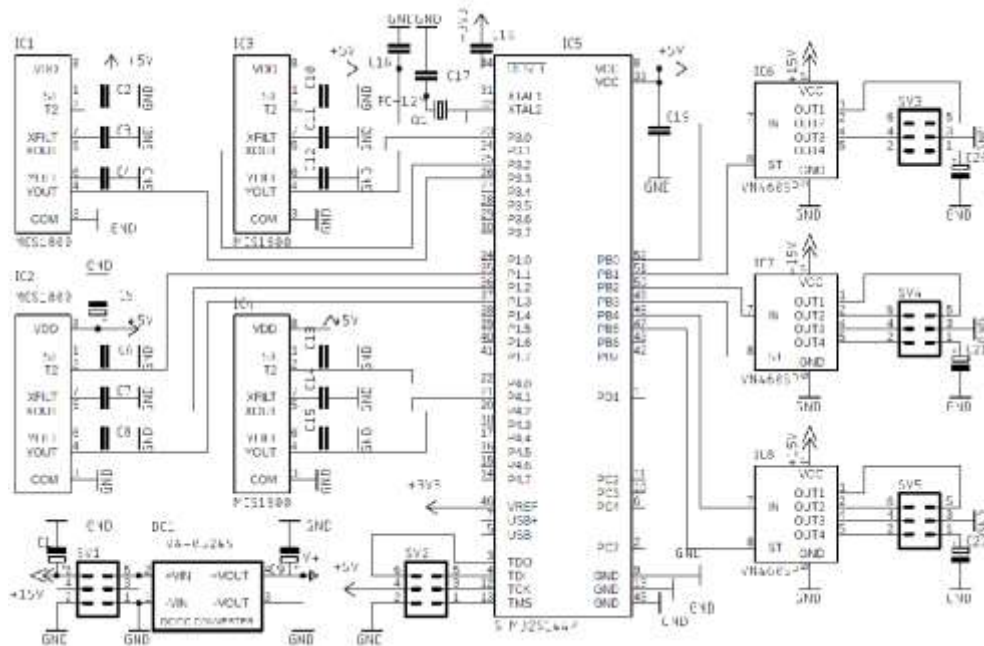


Рисунок 3.2 – Схема електрична принципова прототипу системи вимірювання кута повороту

На основі електричної схеми із застосуванням системи автоматизованого проектування була розроблена конструкція друкованої плати системи (рис. 3.3).

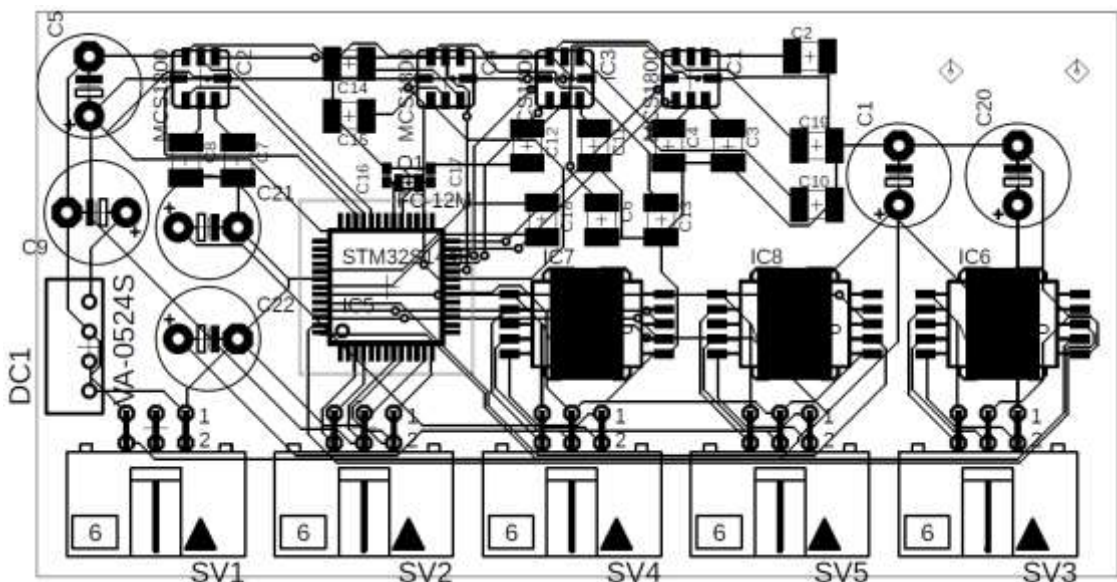


Рисунок 3.3 – Конструкція друкованої плати системи контролю з компонентами схеми (графіка САПР)

ВИСНОВКИ

Технологія магнітного датчика життєво важлива в таких галузях, як автомобілебудування, промислова автоматизація та медичне обладнання, де перешкоди від зовнішніх магнітних полів можуть впливати на точність і продуктивність. Топологія диференціального вимірювання реалізована в датчиках положення MPS — таких як MA900 і MAQ79010FS — і датчиках струму. Ці пристрої усувають синфазний шум і забезпечують надійну, високоточну роботу.

В процесі виконання кваліфікаційної роботи бакалавра були розглянути питання застосування диференційних магнітних сенсорів, сфери їх застосування, особливості, характеристики.

Розроблена структура, схема електрична принципова і конструкція пристрою із застосуванням системи автоматизованого проектування.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Бондаренко І.М., Бородін О.В., Карнаушенко В.П. Проектування напівпровідникових приладів та інтегральних схем: Навч. посібник для студентів ЗВО. – Харків: ХНУРЕ. – 2019. – 177 с.
2. Бондаренко І.М., Бородін О.В., Карнаушенко В.П. Сучасна компонентна база електронних систем: Навч. посібник для студентів ЗВО. – Харків: ХНУРЕ. – 2020. – 241с.
3. Бондаренко І.М., Бородін О.В., Карнаушенко В.П. Мікропроцесорні системи контролю та керування: Навч. посібник для студентів ЗВО. – Харків: ХНУРЕ. – 2020. – 248с.
4. Інформаційні технології в транспортних додатках. Горбенко Є.О., Васильєв Ю.С., Карнаушенко В.П., Пятайкіна М.І. Збірник матеріалів IV форуму «Автоматизація, електроніка та робототехніка. Стратегії розвитку та інноваційні технології» АЕРТ-2022. – Харків, ХНУРЕ, 2022. – 178 с.
5. «Прилади та пристрої інтегральної електроніки» Карнаушенко В.П. Бондаренко І.М., Бородін О.В., Васильєв Ю.С. Навч. посібник для студентів ЗВО. – Харків: ХНУРЕ. – 2020. – 248с.
6. Field Programmable Counter Arrays Integration with Field Programmable Gates Arrays, р.р.14-16. I Міжнародна науково-практична конференція «Теоретичні та прикладні аспекти розробки пристроїв на мікроконтролерах і ПЛІС» MS&FPGA-2019.
7. Головні тенденції у виробництві електроніки. Васильєв Ю.С., Горбенко Є.О., Карнаушенко В.П., Пятайкіна М.І. Збірник матеріалів IV форуму «Автоматизація, електроніка та робототехніка. Стратегії розвитку та інноваційні технології» АЕРТ-2022. – Харків, ХНУРЕ, 2022. – 178.
8. Перехід до промисловості 4.0 з прогнозованими рішеннями для обслуговування. Карнаушенко В., Васильєв Ю., Горбенко Є., Пятайкіна М.