

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів)

Демонстраційний матеріал – 16 слайдів

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел	21.11.22 – 24.11.22	Виконано
	Оформлення пояснювальної записки	25.11.22 – 29.11.22	Виконано
	Оформлення графічних та демонстраційних матеріалів	30.11.22 – 10.12.22	Виконано
	Проходження нормоконтролю та отримання рецензії	11.12.22 – 13.12.22	Виконано
	Підготовка та захист атестаційної роботи	13.12.22 – 15.12.22	Виконано

Дата видачі завдання 21 11 2022 р.

Студент _____

(підпис)

Керівник роботи _____ проф. Грицунов О.В. _____

(підпис)

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської атестаційної роботи містить 92 сторінка, 51 рисунок, 10 таблиць, 23 джерел літератури.

МІКРОКОНТРОЛЕР, СИГНАЛ, ОБРОБКА СИГНАЛУ, ПРОТОКОЛ ПЕРЕДАЧІ СИГНАЛУ, ПРОГРАМУВАННЯ, LCD, ЕФЕКТ ХОЛЛА.

Об'єкт дослідження – інформаційно-вимірювальний комплекс для обліку витрати електроенергії.

Мета роботи – розробка об'єкта досліджень та програмного забезпечення.

Метод досліджень – автоматизоване проектування на ЕОМ.

Пояснювальна записка складається з п'яти розділів: огляд літератури і постановка задачі проектування, науково-дослідна частина, розроблення, обґрунтування алгоритму та структурної схеми, розробка принципової схеми та вибір елементної бази, розроблення програмного забезпечення.

Графічна частина пояснювальної записки містить схему алгоритм (СА), структурну схему (Е1), функціональну схему (Е2) та принципову схему (Е3).

В першому розділі проведений огляд теперішнього рівня техніки в галузі обліку електроенергії. Розібрано принцип роботи та фізичні закони, завдяки яким вдається точно розраховувати спожитий струм. Сформоване завдання проектування.

В другому розділі наведена інформація про досліді ефекту Холла, на якому побудовані безпечні датчики постійного або змінного струму.

В третьому розділі наведена розробка та обґрунтування схеми алгоритму функціонування системи. На її основі розроблена структурна схема.

В четвертому розділі проведений вибір елементної бази.

В п'ятому розділі наведена реалізація безперебійного джерела живлення та наведений код, за яким мікроконтролер обробляє отримані з датчика дані та переводить їх в зрозумілі людині.

ABSTRACT

The explanatory note to the master's thesis contains 92 pages, 51 figures, 10 tables, and 23 literature sources.

MICROCONTROLLER, SIGNAL, SIGNAL PROCESSING, SIGNAL TRANSMISSION PROTOCOL, PROGRAMMING, LCD, HALL EFFECT.

The object of the research is an information and measurement complex for accounting for electricity consumption.

The purpose of the work is the development of the object of research and software.

The research method is computer-aided design.

The explanatory note consists of five sections: review of the literature and formulation of the design problem, scientific research part, development, substantiation of the algorithm and structural scheme, development of the schematic diagram and selection of the element base, software development.

The graphic part of the explanatory note contains an algorithm diagram (CA), a structural diagram (E1), a functional diagram (E2) and a schematic diagram (E3).

In the first chapter, an overview of the current state of the art in the field of electricity metering is carried out. The principle of operation and physical laws, thanks to which it is possible to accurately calculate the consumed current, are analyzed. Formed design task.

The second section provides information on Hall effect experiments, on which safe direct or alternating current sensors are built.

In the third section, the development and justification of the scheme of the system functioning algorithm is presented. Based on it, a structural scheme was developed.

In the fourth section, the element base is selected.

In the fifth chapter, the implementation of an uninterruptible power supply is given and the given code is given, according to which the microcontroller processes the data received from the sensor and translates them into a human-understandable form.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	7
ВСТУП.....	8
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ПРОЕКТУВАННЯ.....	9
1.1 Огляд літератури	9
1.2 Постановка завдання проектування	24
2 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА	25
3 РОЗРОБЛЕННЯ, ОБГРУНТУВАННЯ АЛГОРИТМУ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ.....	39
3.1 Розроблення алгоритму функціонування пристрою	39
3.2 Розробка структурної схеми пристрою.....	44
4 ВИБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ.....	46
4.1 Вибір мікроконтролера.....	46
4.1.1 Платформа Arduino Nano	46
4.1.2 ESP07-S.....	49
4.2 Модуль реального часу.....	54
4.2.1 DS1302.....	54
4.2.2 DS1307	57
4.2.3 DS3231	62
4.3 Датчик струму ACS712.....	68
4.4 Датчик напруги ZMPT101B	76
4.5 Аналогово-цифровий перетворювач ADS1015	78
5 РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ОКРЕМИХ ЛАНЦЮГІВ СИСТЕМИ.....	82
5.1 Реалізація безперебійного джерела живлення	82
5.2 Реалізація виводу інформації.....	84
5.3 Код для датчика струму ACS712 на ефекті Холла	86
ВИСНОВКИ.....	88
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	90
ДОДАТКИ.....	91

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АЕХ – аномальний ефект Холла;

АСКОЕ – автоматизована система комерційного обліку електричної енергії;

ЗВТ – засоби вимірювальної техніки;

ОЗП – оперативний запам'ятовуючий пристрій;

ППКО – постачальник послуг комерційного обліку електричної енергії;

СЕХ – спіновий ефект Холла;

SS – skew-scattering;

SJ – side-jump;

SOI – Spin-orbit interaction;

SOC – System-on-a-Chip.

ВСТУП

Початок 21 сторіччя можна охарактеризувати швидко розвиваючим в сфері безпроводної передачі інформації та в області мікроконтролерів. Прогрес в цих сферах настільки суттєвий, що всього якихось 20 років тому людство використовувало друге покоління технологій бездротового телефонного зв'язку (2G) зі швидкістю до 14,4 кБіт/с, а зараз у високо розвинених країнах на повну використовується стандарт п'ятого покоління бездротового телефонного зв'язку з швидкістю передачі даних, яка досягає 100 мБіт/с. В свою чергу, мікроконтролери та мікропроцесори стали набагато потужніші, компактнішими, дешевшими, стали споживати менше електроенергії, що стало основною причиною їх масового використання в повсякденних речах. Будь-яка звичайна річ, відома нам як «елементарна» почала мати в своїй будові мікроконтролер, що дозволили досягти небувалого рівня комфорту для кінцевого користувача.

Час та інформація, стали найціннішими ресурсами, тому будь-яка річ яка дозволяє автоматизувати циклічні процеси, відповідно економлячи час – стає невід'ємною частиною життя сучасної людини. В цій роботі, ми спробуємо максимально спростити та покращити дію, яку доросла людина повинна робити кожного дня, а саме – передавання показників лічильника електроенергії, який розташований в багатоквартирному будинку.

Система повинна автоматизувати циклічний процес та покращити якість життя користувача, так і обслуговуючого персоналу системи.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ПРОЕКТУВАННЯ

1.1 Огляд літератури

Так як поняття інформаційно-вимірювального комплексу для обліку витрати електроенергії має на увазі спілкування користувача з надавачем послуг, необхідно звернутися до законів, які регулюють такого типу відносини, а саме до «Кодексу комерційного обліку електричної енергії». Це необхідно зробити для формування первинних вимог до системи, яку ми розробляємо. Наведемо нижче пункти кодексу, які безпосередньо стосуються нашої системи.

Експлуатацію та використання справних і повірених засобів комерційного обліку електричної енергії (зокрема після проведення їх повторної параметризації, періодичної перевірки, обслуговування та ремонту, зміни постачальника електроенергії, а також після зміни форми власності чи власника (користувача) засобів комерційного обліку, електроустановок або об'єкта, де встановлені ці засоби комерційного обліку) не може бути заборонено або обмежено з причин їх невідповідності вимогам цього Кодексу за умови, що ці засоби комерційного обліку:

- мають технічні характеристики, що відповідають або перевищують вимоги проектних рішень, нормативно-правових актів та нормативних документів щодо комерційного обліку електричної енергії, які були чинними на день введення їх в експлуатацію;
- забезпечують можливість здійснення розрахунків між учасниками ринку відповідно до укладених договорів [1].

З вище описаного витягу з Кодексу, можемо сформулювати першу вимогу для проекту – пристрій повинен мати невеликі габарити та легко демонтуватися з місця постійної роботи для проведення необхідних періодичних перевірок та обслуговування.

Юридична або фізична особа яка є споживачем електроенергії зобов'язана:

- надавати дозвіл уповноваженим представникам ППКО, оператора мережі на доступ до власних об'єктів, вузлів обліку (з урахуванням вимог до безпеки виконання робіт), результатів вимірювання, а також забезпечувати

присутність уповноваженого представника сторони, яка під'єднана до мережі, під час обстеження (перевірки) та негайно повідомляти їх про виявлені недоліки в роботі ЗВТ, що встановлені у відповідних точках вимірювання, та допоміжного обладнання вузлів обліку;

- надавати ППКО, з якими сторона приєднана до мережі уклала договір, доступ до своїх електроустановок для здійснення монтажу, технічного обслуговування та зняття показів та інших даних комерційного обліку з вузлів обліку.

Індивідуальні побутові споживачі зобов'язані щомісяця зчитувати фактичні покази зі всіх лічильників, встановлених на об'єкті споживача, для яких відсутня можливість дистанційного зчитування даних та надавати їх до кінця третього календарного дня місяця, що настає за розрахунковим, відповідному оператору системи розподілу або ППКО в один із таких способів:

- через особистий кабінет на сайті оператора системи розподілу або ППКО;
- за телефоном чи іншими електронними засобами;
- шляхом зазначення цих показів у сплаченому рахунку;
- через особисте звернення або іншим зручним та прийнятним для сторін способом згідно з укладеним договором.

Зчитування показів з лічильників, встановлених у споживачів, може здійснюватися споживачем, а також оператором системи або ППКО відповідно до цього Кодексу та умов договору [2,3].

З вище описаного витягу з Кодексу, можемо сформулювати другу вимогу до проекту – пристрій повинен монтуватися в легко доступному місці, для легкого доступу співробітниками обслуговуючої компанії, на випадок, коли автоматична передача показників буде недоступна довгий період час.

Мінімальні вимоги до класу точності та функціональності ЗВТ (лічильників і вимірювальних трансформаторів) у складі вузлів обліку під час проектування нового будівництва, модернізації, реконструкції, технічного переоснащення або капітального ремонту електроустановок, а також при встановленні та заміні ЗВТ, у

залежності від рівня напруги та потужності, наведено в табл. 1.1. Дозволяється використання ЗВТ вищого класу точності та функціональності.

При втраті живлення результати вимірювань електричної енергії та потужності мають зберігатись у вбудованій пам'яті, що здатна зберігати зареєстровані значення, не менше 40 діб.

Лічильник, якщо він призначений для інтервального вимірювання, має містити годинник.

Таблиця 1.1 – Залежність класу точності лічильника від потужності

Приєднана потужність S(Повна), P(активна)	Наявність зовнішнього джерела живлення	Лічильники		Період формування та передачі даних
		Активна енергія	Реактивна енергія	
Понад 160кВА,150кВт	Ні	B (1,0)	2	Щодоби, щомісяця
До 160кВА,150кВт	Ні	A (2,0)	3	Щодоби, щомісяця

Лічильники, якщо вони містять годинники та живляться від електромережі, повинні бути забезпечені джерелом резервного живлення (резервною батареєю). Конструкція резервного живлення повинна гарантувати достатню потужність джерела живлення для забезпечення допустимого відхилення часу годинника від точного часу в межах часових рамок, установлених для синхронізації часу. Для точності кварцового годинника лічильників повинні застосовуватися вимоги ДСТУ EN 62054-21:2015 Вимірювання електричної енергії змінного струму. Годинники повинні мати можливість налаштування часу за допомогою інтерфейсу користувача, інтерфейсу зв'язку та повинні бути забезпечені можливістю зовнішньої синхронізації часу за допомогою інтерфейсу зв'язку. Для синхронізації часу годинників застосовуються вимоги ДСТУ EN 62054-21.

Якщо час у годиннику відхиляється більше ніж на ± 10 секунд від точного часу, годинник повинен бути синхронізований відразу ж після виявлення цього відхилення. Це може бути зроблено на місці уповноваженою особою ППКО за допомогою інтерфейсу користувача або інтерфейсу зв'язку або автоматично системою ППКО через інтерфейс зв'язку.

Зчитані та передані індивідуальним побутовим споживачем покази лічильника протягом періоду, що починається за два календарні дні до кінця розрахункового місяця та закінчується на третій календарний день наступного розрахункового періоду (календарного місяця), вважаються показами на початок першої доби календарного місяця.[4].

З вище описаного витягу з Кодексу, можемо сформулювати третю вимогу для проекту – пристрій повинен мати в своїй будові акумуляторну батарею, яка гарантуватиме системі збереження даних протягом 40 діб після вимкнення живлення. Також, система повинна мати в своїй будові модуль годинника реального часу, для відслідковування періоду доби (для реалізації двох-зонного лічильника) та передачі показників в чітко обраний час або часовий діапазон.

Конструкція індукційного лічильника. На рис. 1.1 зображений зовнішній вигляд типового індукційного лічильника, основною візуальною рисою є аналоговий механізм індикатору спожитої енергії. Основними внутрішніми складовими елементами індукційного електролічильника є електромагніти напруги та електричного струму. При їх взаємодії разом з магнітопроводами, що входять до них, з'являється електромагнітне поле. Через передавальний пристрій поле обертає алюмінієвий диск, до якого через черв'ячну передачу приєднаний аналоговий циферблат. Різьбу розраховано таким чином, щоб десять повних обертів алюмінієвого диску змінювали вимірювальну шкалу на одиницю.

На рис. 1.2 зображені зовнішні позначення індукційного лічильника електроенергії. З рисунка видно, що пристрій має аж дві пломби, які запобігають несанкціонованому доступу до внутрішньої будови. Це здійснено з метою запобігання будь-яких операцій з лічильником сторонніми, некваліфікованими

особами, як у випадку можливого ремонту, так і для запобігання маніпуляцій з вимірювальною шкалою, з метою шахрайства.



Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд індукційного лічильника

Електромагніт струму при роботі зазнає великих навантажень, тому його обмотка виготовлена з мідного дроту великого перерізу. Число витків не перевищує тридцяти. Дріт рівномірно намотаний на двох магнітах, які за допомогою затискачів підключені послідовно до мережі.

Котушка напруги паралельно приєднана до мережі і створює електромагнітне поле, прямо пропорційне діючій напрузі. Обмотка котушки виконана з тонкого дроту перетином 0,1...0,15 мм. Число витків може досягати 12000, що дозволяє створити індуктивний опір більшим, ніж активний.

Усі компоненти механічного однофазного електролічильника розміщені у пластмасовому корпусі. Дані про витрати електрики за поточний період виводяться

на аналоговий барабан. Інтенсивність витрати енергії можна визначити за величиною швидкості обертання диска.

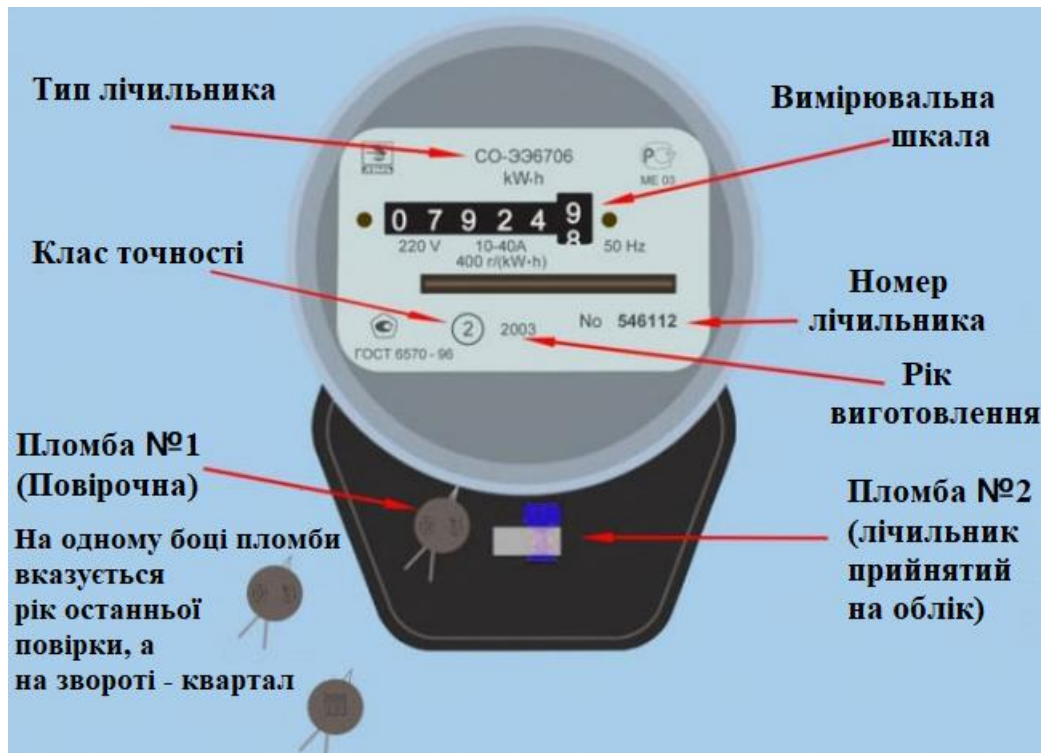


Рисунок 1.2 – Зовнішні позначення індукційного лічильника

Елементарна внутрішня будова індукційного електролічильника зображена на рис. 1.3. Алюмінієвий диск індукційного лічильника електричної енергії є рухомим струмопровідним елементом, на який впливає електромагнітне поле, створюване в котушках лічильника. В результаті їх дії виникає магнітне поле, змінне за напрямком і діє на диск, в якому створюються вихрові струми, що збігаються у напрямку магнітних потоків.

Між вихровими струмами і магнітними потоками відбувається взаємодія, яка створює крутний момент, що змінюється за величиною і веде до обертання алюмінієвий диск. Між моментом, що обертає і сумарним магнітним потоком від двох котушок струму і напруги створюється залежність, з урахуванням зсуву фази на 90° і зворотним зв'язком. Для отримання зсуву фази, магнітний потік електромагніту напруги розкладено на дві частини.

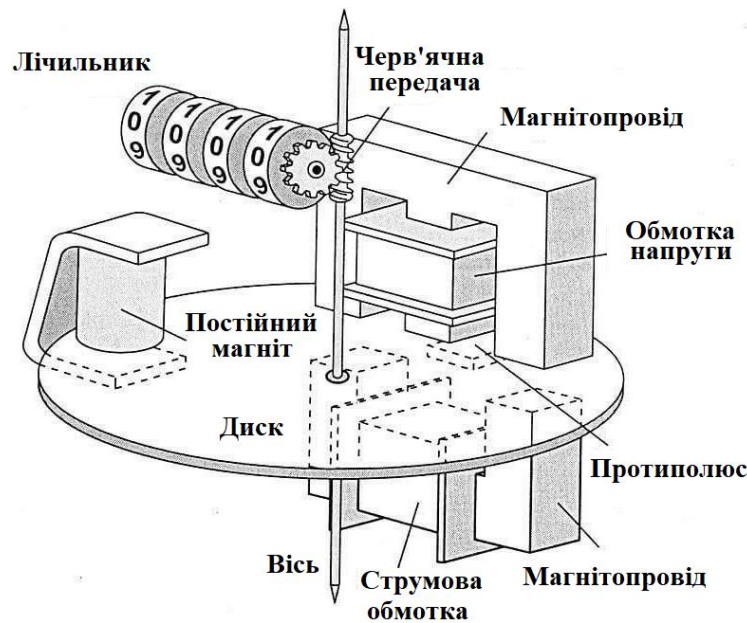


Рисунок 1.3 – Елементарна внутрішня будова індукційного лічильника

Під впливом крутного моменту диск крутиться з частотою залежно від величини енергії, що надходить. Вісь диска пов'язана з рахунковим пристроєм цифрового барабана, на якому відображається дійсна кількість енергії, що споживається.

Перерахуємо переваги індукційного лічильника електричної енергії:

- мають високий рівень надійності;
- проста схема роботи та принцип дії;
- вартість електрлічильника старого зразка нижча за електронний;
- стійкість до можливих перепадів напруги електричної мережі;
- мають тривалий термін експлуатації.

У той же час електромеханічні лічильники мають і ряд недоліків, до яких належать:

- низький клас точності обліку електричної енергії, особливо за малих навантажень;
- для оплати електроенергії використовується лише один тариф, тоді як більшість електричних компаній надає різну вартість електроенергії у денний та нічний час;

- можливість зупинити обертання диска і навіть відмотати показники назад, чим можуть скористатися несумлінні користувачі.

Усі недоліки, властиві індукційним виробам, відомі заводам-виробникам. Вони постійно працюють над модернізацією та покращенням якості своєї продукції, підвищуючи клас точності та термін служби. Однак особливості конструкції не дозволяють повною мірою втілити всі ці корисні умови у пристрої.

Конструкція цифрового лічильника. На рис. 1.4 зображений зовнішній вигляд 3-х фазного цифрового лічильника, основною візуальною рисою є LCD-дисплей та відсутність рухомих об'єктів. Основне призначення приладу зводиться до постійного вимірювання споживаної потужності контрольованої ділянки електричної схеми та відображення її величини. Елементна база використовує твердотільні електронні компоненти, що працюють на напівпровідниках або мікропроцесорних конструкціях. Такі прилади випускають для роботи з ланцюгами струму постійної величини та синусоїдальної гармонійної форми.

Прилади обліку електроенергії постійного струму працюють лише на промислових підприємствах, що експлуатують потужне обладнання з великим споживанням постійної потужності (електрифікований залізничний транспорт, електромобілі, тощо). З побутовою метою вони не використовуються, випускаються обмеженими партіями. Тому в подальшому їх розглядати не будемо, хоча принцип роботи відрізняється від моделей, що працюють на змінному струмі, в основному конструкцією датчиків струму і напруги.

Основні елементи лічильника:

1. Тип та виконання лічильника;
2. Електронний дисплей;
3. Механічна кнопка «перегляд»;
4. Механічна кнопка «вибір»;
5. Пломбувальні гвинти;
6. Робоча температура лічильника;
7. Пломбувальні гвинти кришки затискачів;
8. Кришка затискачів;

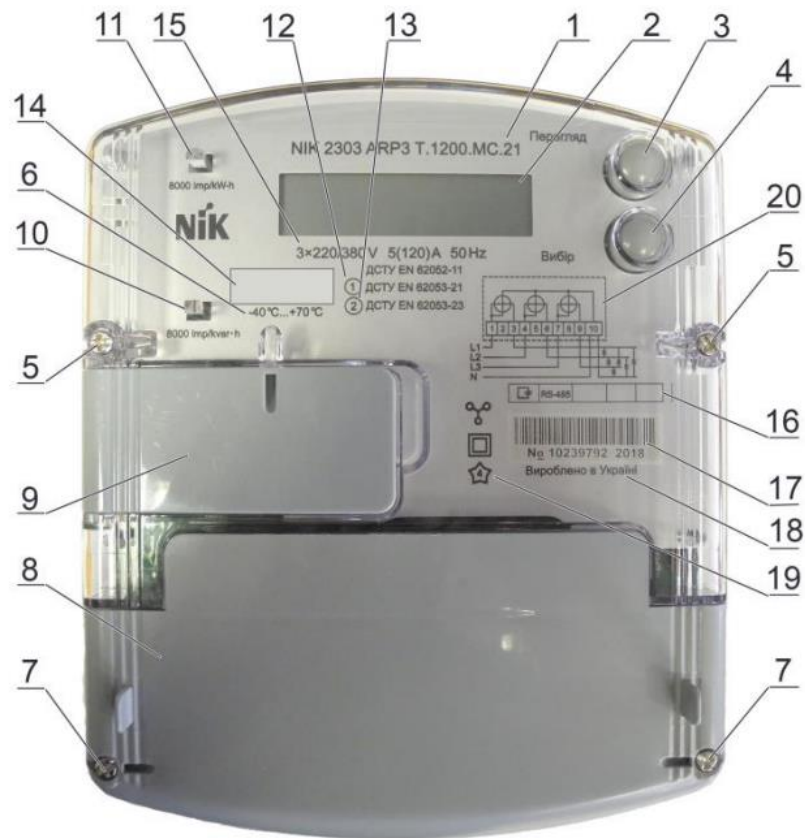


Рисунок 1.4 – Зовнішній вигляд і розташування елементів управління

9. Пломбувальні гвинти кришки затискачів;
10. Кришка затискачів;
11. Кришка оптичного порту;
12. Індикатор функціонування реактивної енергії;
13. Індикатор функціонування активної енергії;
14. Клас точності активної енергії – 1;
15. Клас точності реактивної енергії – 2;
16. Місце для нанесення знаку оцінки відповідності та додаткового метрологічного маркування;
17. Технічні характеристики лічильника;
18. Наявність інтерфейсів та реле згідно виконання;
19. Штрих-код, заводський номер та рік виготовлення;
20. Назва країни-виробника;

21. Умовні позначення кількості вимірювальних елементів, класу захисту та випробувальної напруги;

22. Схема підключення лічильника.

Електронні лічильники потужності змінного струму виготовляються для обліку енергії електричних пристроїв з однофазною системою напруги та у трифазних ланцюгах. Вся елементна база розташовується всередині корпусу з:

- клемною колодкою для підключення електричних дротів;
- панеллю дисплея;
- органами управління роботою та передачі інформації від приладу;
- вимірювальними трансформаторами;
- друкованою платою з твердотільними елементами;
- захисним кожухом.

Внутрішній вигляд плат і основні елементи однієї з поширених моделей 3-х фазного лічильника, представлений на рис. 1.5. Працездатність такого електролічильника підтверджується:

- нанесеним тавром, що підтверджує проходження метрологічної повірки приладу на випробувальному стенді та оцінці його характеристик у межах заявленого виробником класу точності;
- цілою пломбою підприємства енергонагляду, відповідального за правильне підключення лічильника до електричної мережі.

Робота внутрішніх алгоритмів трифазних або однофазних конструкцій відбувається за одними і тими ж законами, за винятком того, що в 3-х фазному, більш складному пристрої, йде геометричне підсумовування величин кожного з трьох складових каналів.

Тому принципи роботи електронного лічильника переважно розглядатимемо на прикладі однофазної моделі. Для цього згадаємо основні закони електротехніки, пов'язані із потужністю, її повна величина визначається активною і реактивною складовою, зобразимо відповідну векторну діаграму на рис. 1.6 та рис. 1.7.

Струм, що протікає по загальному ланцюгу однофазної мережі, однаковий на всіх ділянках, а падіння напруги на кожному її елементі залежить від виду опору та

його величини. На активному опорі воно збігається з вектором струму, що проходить, а на реактивному відхиляється в бік. Причому на індуктивності воно випереджає струм кут, а в ємності — відстає. Електронні лічильники здатні враховувати та відображати повну потужність та її активну та реактивну величину. Для цього здійснюються вимірювання векторів струму з напругою, підведених на його вхід. За значенням відхилення кута між цими вхідними величинами визначається і розраховується характер навантаження, надається інформація про її складові.

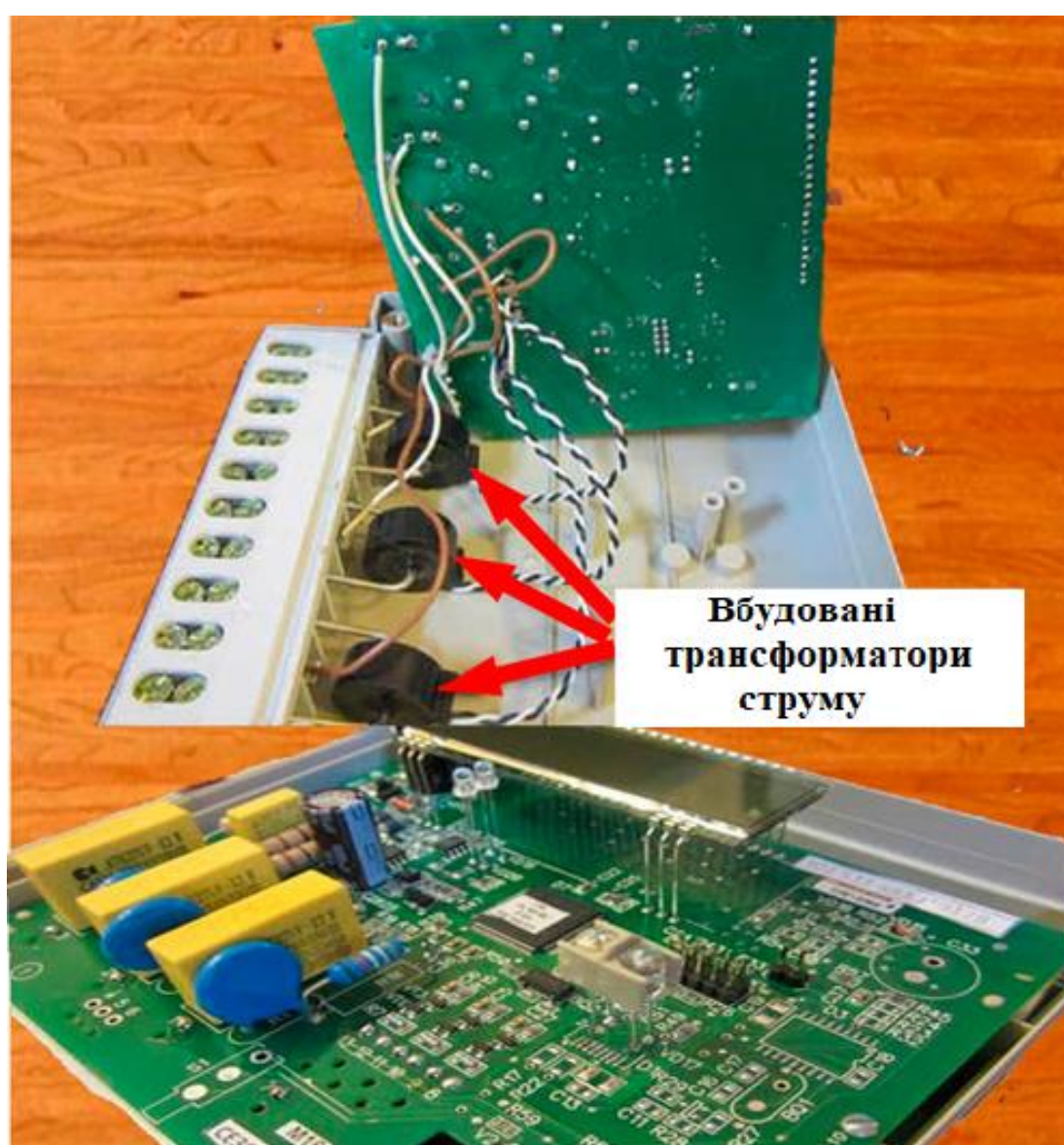


Рисунок 1.5 – Внутрішня будова 3-х фазного цифрового лічильника

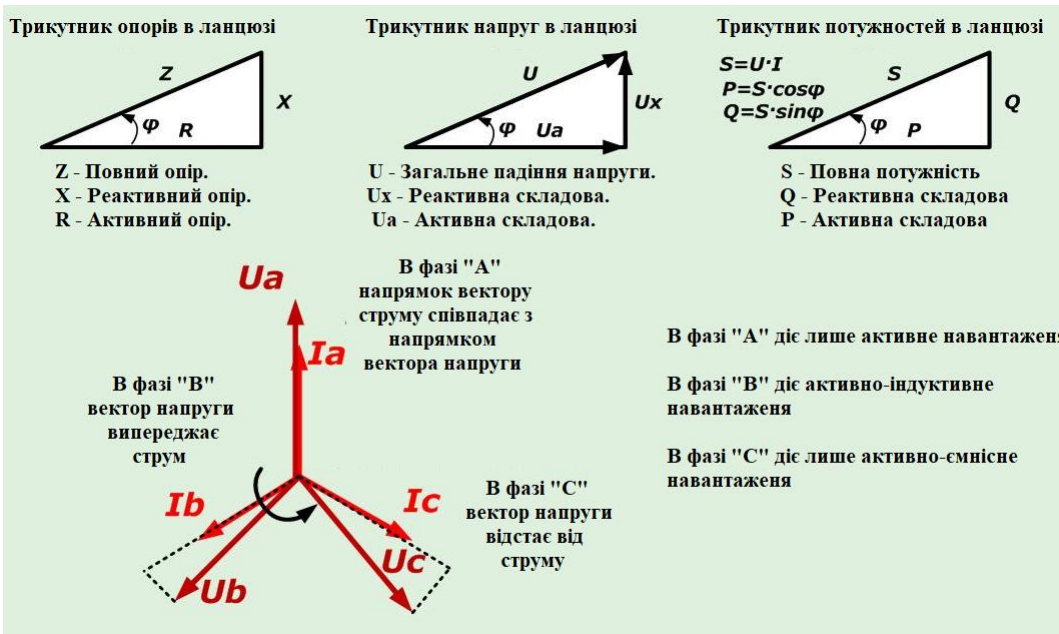


Рисунок 1.6 – Векторна діаграма струмів і напруг в 3-х фазній системі

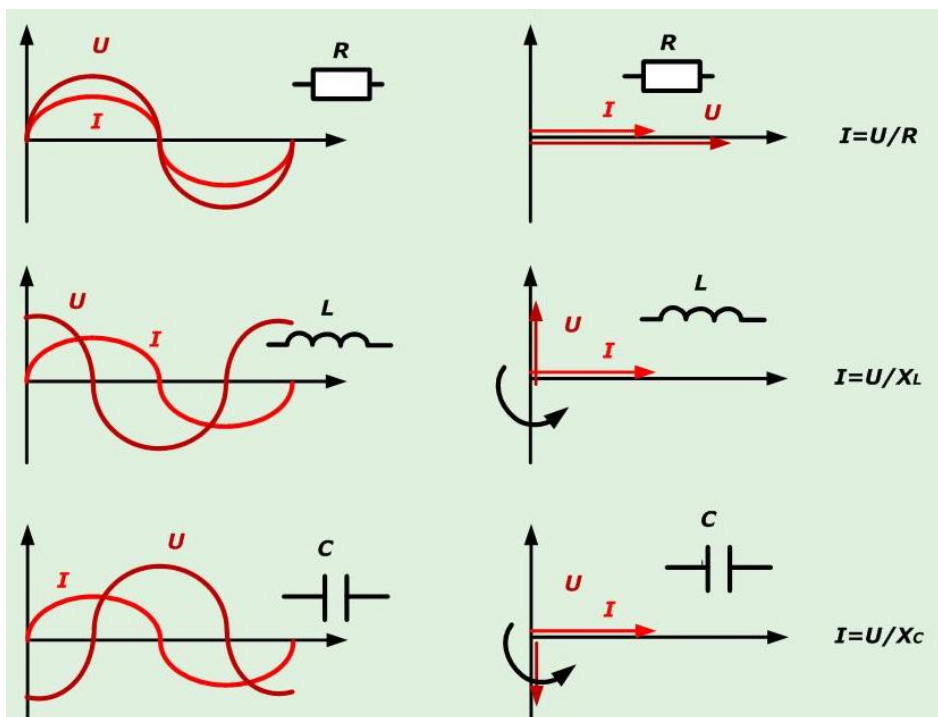


Рисунок 1.7 – Електричне відношення між струмом та напругою

У різних конструкціях електронних лічильників набір функцій неоднаковий і може відрізнитися своїм призначенням. Цим вони кардинально відрізняються від своїх індукційних аналогів, які працюють на основі взаємодії електромагнітних полів та сил індукції, що викликають обертання тонкого алюмінієвого диска.

Конструктивно вони здатні заміряти тільки активну або реактивну потужність в однофазному або трифазному ланцюзі, а значення повного – доводиться обчислювати окремо вручну.

Розглянемо принцип роботи простого приладу обліку з вихідними перетворювачами. У ньому для вимірювання потужності використовуються прості датчики:

- струму на основі звичайного шунта, через який пропускається фаза ланцюга;
- напруги, що працює за схемою дільника.

Сигнал, що знімається такими датчиками, слабкий, тому його збільшують за допомогою електронних підсилювачів струму та напруги, після яких відбувається аналогово-цифрова обробка для подальшого перетворення сигналів та їх перемноження з метою отримання величини, пропорційної значенню споживаної потужності. Далі проводиться фільтрація оцифрованого сигналу та виведення на пристрій:

- індикації;
- інтегрування;
- передачі вимірів;
- подальшого перетворення.

Схеми роботи простих приладів обліку з вихідними перетворювачами показані на рис. 1.8 та 1.9.



Рисунок 1.8 – Структурна схема електронного лічильника



Рисунок 1.9 – Структурна схема електронного однофазного лічильника

Вхідні датчики електричних величин, що застосовуються в цій схемі, не забезпечують вимірювання з високим класом точності векторів струму і напруги. Ця функція найкраще реалізується в схемі з вимірювальними трансформаторами, розглянемо таку схему на прикладі роботи однофазного електронного лічильника. У ній вимірювальний трансформатор струму включений у розрив фазного дроту споживача, а трансформатор напруги підключений до фази та нуля.

Сигнали з обох трансформаторів не потребують посилення і направляються своїми каналами на блок АЦП, що здійснює перетворення їх у цифровий код потужності і частоти. Подальші перетворення виконує мікроконтролер, який здійснює управління:

- LCD-дисплеєм;
- електронним реле;
- оперативним запам'ятовуючим пристроєм (ОЗП).

Через ОЗП, вихідний сигнал може передаватися далі, через канал інформації, наприклад, за допомогою оптичного порту.

Низька похибка вимірювання потужності, що оцінюється класом точності 0,5S або 0,2S, дозволяє експлуатувати ці прилади з метою комерційного обліку використаної електроенергії.

Конструкції, призначені для вимірювання в трифазних схемах, можуть працювати в трьох або чотирьох електричних ланцюгах.

Електронний лічильник може підключатися до діючого обладнання або мати конструкцію, що дозволяє використовувати проміжні, наприклад, вимірювальні високовольтні трансформатори. В останньому випадку, як правило, здійснюється автоматичний перерахунок вимірюваних вторинних величин у первинні значення струму, напруги та потужності, включаючи активну та реактивну складові.

Лічильник фіксує напрямок повної потужності з усіма її складовими у прямому та зворотному напрямку, зберігає цю інформацію з прив'язкою до часу. При цьому користувачеві можна знімати показання енергії з її збільшення за певний період часу, наприклад, поточні або у вибраний з календаря день, місяць або рік або накопичення на визначений час.

Фіксація значень активної та реактивної потужності за певний період, наприклад, 3 або 30 хвилин, а також швидкий виклик її максимальних значень протягом місяця значно полегшує аналіз роботи енергетичного обладнання.

У будь-який момент можна переглянути миттєві показники активного та реактивного споживання, струму, що діє, напруги, частоти в кожній фазі.

Наявність функції багатотарифного обліку енергії з допомогою кількох каналів передачі розширює умови комерційного застосування. При цьому створюються тарифи для певного часу, наприклад, кожної півгодини вихідного або робочого дня за сезонами або місяцями року.

Для зручності роботи на дисплеї виводиться робоче меню між пунктами якого можна переміщатися, використовуючи поруч розташовані органи управління.

Електронний лічильник електроенергії дозволяє не тільки зчитувати інформацію з дисплея, але й переглядати її через віддалений комп'ютер, а також вводити додаткові дані або їх програмування через оптичний порт.

Усі події зняття та встановлення кришки обладнані сигналізацією, спрацьовування якої фіксується в пам'яті журналу подій з прив'язкою до часу та дати. Система паролів передбачає обмеження користувачів доступу інформації і може містити до п'яти обмежень.

Нульовий рівень повністю знімає обмеження та дозволяє переглядати всі дані місцево чи віддалено, синхронізувати час, коригувати показання.

Перший рівень додаткового доступу надається працівникам монтажної або експлуатаційної організації систем АСКОЕ для налагодження обладнання та запису параметрів, що не впливають на комерційні характеристики.

Другий рівень основного доступу призначається працівником енергонагляду на лічильнику, що пройшов налагодження та підготовлений до роботи.

Третій рівень основного доступу дається працівникам енергонагляду, які здійснюють зняття та встановлення кришки з лічильника для доступу до його клемних затискачів або проведення віддалених операцій через оптичний порт.

Четвертий рівень надає можливості встановлення апаратних ключів на плату, видалення всіх встановлених пломб та можливість роботи через оптичний порт для вдосконалення конфігурації, заміни калібрувальних коефіцієнтів.

1.2 Постановка завдання проектування

Метою роботи є розробка прототипу системи для однофазної мережі багатоквартирного будинку, яка автоматизує циклічну роботу з передачею показників лічильника електроенергії. В той же час, прототип не повинен проходити відповідну сертифікацію, а лише наблизитись до відповідного рівня. Він повинен показати можливість вдосконалення та відповідно підвищений комфорт користування. Прототип системи повинен забезпечувати такі функції:

- вимірювати послідовний струм;
- вимірювати послідовну напругу;
- мати автономність протягом 40 діб, для збереження результатів вимірювання;
- можливість слідкувати за показниками зі смартфона;
- відраховувати час та дату;
- синхронізувати час з мережевим часом;
- автоматично відправляти показники лічильника на сервер надавача послуг;
- мати максимально можливо модульну структуру;
- бути максимально безпечним для користувача та обслуговуючого персоналу;
- мати дисплей, на якому будуть показані основні характеристики мережі.

2 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

Ефект Холла – це виникнення в електричному провіднику різниці потенціалів на краях зразка поміщеному в поперечне магнітне поле при протікання струму перпендикулярно полю, приклад якого наведено на рис. 2.1. Це явище було відкрито в 1879 році американським фізиком Едвіном Гербертом Холлом [5]. Електричне поле, або поле Холла, є результатом сили, з якою магнітне поле діє на рухомі позитивні або негативні частинки, які утворюють електричний струм. Незалежно від того, чи є струм рухом позитивних частинок, негативних частинок у протилежному напрямку або їх сумішшю, перпендикулярне магнітне поле зміщує рухомі електричні заряди в одному напрямку вбік під прямим кутом як до магнітного поля, так і до напрямку поточного потоку. Накопичення заряду на одній стороні провідника залишає іншу сторону протилежно зарядженою та створює різницю потенціалів. Відповідний вимірювальний прилад може визначити цю різницю як позитивну або негативну напругу. Знак цієї напруги Холла визначає, позитивні чи негативні заряди несуть струм.

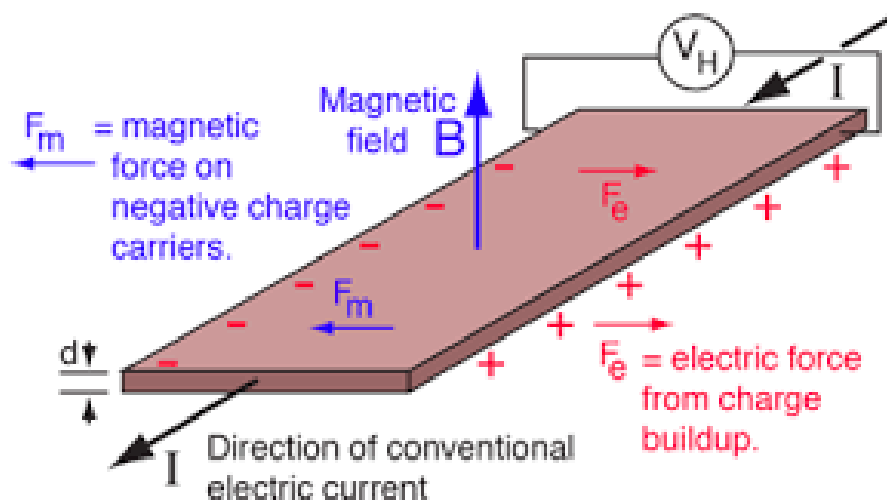


Рисунок 2.1 – Ефект Холла

У металах негативна напруга Холла вказує на те, що електричний струм складається з рухомих негативних зарядів, або електронів. Проте напруга Холла є

позитивною для деяких металів, таких як берилій, цинк і кадмій, що вказує на те, що ці метали проводять електричний струм завдяки руху позитивно заряджених носіїв, які називаються дірками. У напівпровідниках, в яких струм складається з руху позитивних дірок в одному напрямку і електронів в протилежному, знак напруги Холла показує, який тип носія заряду переважає. Ефект Холла також можна використовувати для вимірювання щільності носіїв струму, їх свободи переміщення або рухливості, а також для визначення наявності струму в магнітному полі.

Напруга Холла, яка виникає на провіднику, прямо пропорційна силі струму, магнітному полю та природі самого провідного матеріалу; напруга Холла обернено пропорційна товщині матеріалу в напрямку магнітного поля.

Стандартний ефект Холла пропорційний магнітному полю B , оскільки виникає через силу Лоренца, що діє на носії заряду, що беруть участь у протіканні струму. Крім стандартного ефекту Холла, додатковий компонент напруги Холла був виявлений самим Едвіном Х. Холлом у ферромагнітних металах незабаром після відкриття стандартного ефекту Холла. Цей компонент пропорційний намагніченості M і походить від спин-орбітального зв'язку. Підвищений інтерес викликав аномальний ефект Холла (АЕХ) при його ідентифікації в напівмагнітних напівпровідниках. Через питомий опір Холла, ефект Холла можна виразити формулою (2.1).

$$\rho_H = R_0 H + 4\pi R_s M. \quad (2.1)$$

Перший і другий члени є звичайним і аномальним ефектом Холла відповідно. Коефіцієнти R_0 і R_s називають звичайним і аномальним коефіцієнтом Холла відповідно. В експериментах зі збільшенням H_{ext} , ρ_H спочатку швидко змінюється, а потім має тенденцію до пропорційного збільшення H . Початкова швидка зміна ρ_H викликана вирівнюванням намагніченості домену. Після вирівнювання намагніченості домену ρ_H змінюється пропорційно H_{ext} . Постійний приріст дає значення R_0 , а екстрапольоване значення ρ_H до $H_{ext} = 0$ дає значення $4\pi R_s M$.

Історично внутрішній механізм, який є результатом фази Беррі, вперше був запропонований для АЕХ [6]. Суттєвим моментом у теорії є те, що існує внесок у швидкість від фази Беррі $\Omega(k)$, як показано за допомогою формул (2.2) та(2.3.)

$$\dot{x} = \frac{1}{h} + \frac{\delta\varepsilon(k)}{\delta k} - \dot{k} \cdot \Omega(k), \quad (2.2)$$

$$h\dot{k} = -eE_{ext} - e\dot{x} \cdot B_{ext}. \quad (2.3)$$

Ми бачимо, що швидкість \dot{x} має компонент, перпендикулярний до E_{ext} , навіть коли $B_{ext} = 0$. Член $eE_{ext} \cdot \Omega(k)$ нагадує нам, що $\Omega(k)$ відіграє роль ефективного магнітного поля. Оскільки $\Omega(k)$ є величиною в імпульсному просторі та залежить від хвильового вектору, ефективно поле можна інтерпретувати як магнітне поле в імпульсному просторі. АЕХ, викликана внутрішніми механізмами, називається «внутрішньою» АЕХ.

Однак більшість експериментів, були інтерпретовані зовнішніми механізмами, косим розсіюванням (SS) [7] і боковим стрибком (SJ) [8]. У механізмі SS електрони зі спіном вгору та вниз розсіюються в протилежних напрямках, як показано на рис. 2.2 (А) . З іншого боку, у механізмі SJ відбувається зміщення шляху електрона, як показано на рис. 2.2 (В). У феромагнетиках власний спіновий дисбаланс робить холлівські струми заряду зі спіном вгору та вниз асиметричними та створює напругу Холла, пропорційну поляризації спіну, тобто намагніченості. АЕХ, спричинений зовнішніми механізмами, називають «зовнішнім» АЕХ.

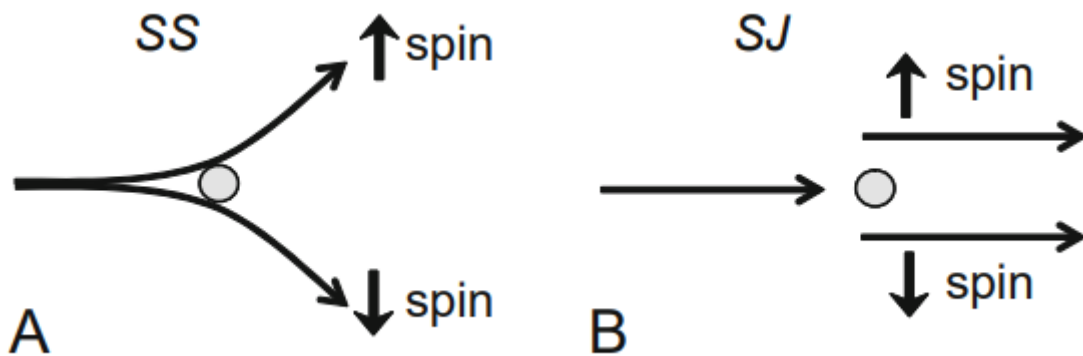


Рисунок 2.2 – Схематичне зображення для (A) косоного розсіювання (SS) і (B) механізмів бокового стрибка

Механізм SS виникає внаслідок розсіювання електронів на домішкових потенціалах і SOI. З іншого боку, SJ спричинений аномальною швидкістю через SOI. Отже, провідність Холла через SS залежить від часу життя t , тоді як провідність через SJ не залежить від t . Що стосується явних виразів SS і SJ, можна посилатися на роботу Креп'є та Бруно [9]. Коефіцієнт АЕХ можна описати формулою (2.4).

$$R_s = \rho_{xy} = (\sigma^{-1})_{xy} = -\frac{\sigma_{xy}}{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{xy}^2} \sim -\frac{\sigma_{xy}}{\sigma_{xx}^2} = a\rho + b\rho^2. \quad (2.4)$$

Оскільки:

- $\sigma_{xx} \propto \tau$;
- механізм SS дає $\rho_{xy} \propto \rho$;
- механізм SJ дає $\rho_{xy} \propto \rho^2$.

Тому відношення 5, де a і b є константами, загалом справедливе і використовується для експериментального аналізу. Зазначається, що власна спінова холлівська провідність також може бути викликана механізмом SJ, оскільки механізм SJ викликаний аномальною швидкістю.

У феромагнітному напівпровіднику АЕХ часто домінує і є зручним інструментом для вивчення магнітних явищ: фазового переходу, гістерезису тощо, особливо коли проблематично провести пряме вимірювання намагніченості. Ця можливість була використана в дослідженнях феромагнітного фазового переходу в

напівмагнітних напівпровідниках, особливо з сімейства III–V: (In,Mn)As та (Ga,Mn)As сплавів.

В стандартному ефекті Холла та в АЕХ дві сторони провідного зразка набувають протилежних зарядів. У спіновому ефекті Холла замість накопичення заряду з'являється спінове накопичення з двох сторін зразка під впливом струму заряду вздовж зразка. В альтернативній версії спінового ефекту Холла спіновий струм призводить до накопичення заряду. Спіновий ефект Холла спочатку розглядався в теоретичних дослідженнях (Дьяконов і Перель, 1971; Хірш, 1999), поки він не був виявлений експериментально (Като та ін., 2004) у тонких шарах GaAs і (In,Ga)As. Хоча спіновий ефект Холла не є специфічним для матеріалів, що містять магнітні іони, його дослідження, безумовно, важливі для розвитку спінтроники [10].

Як згадувалося, зовнішня АЕХ з'являється через спін-залежне розсіювання. Електрони зі спіном вгору і вниз розсіюються в протилежних напрямках, що призводить до струмів Холла зі спіном вгору і вниз вздовж перпендикулярного напрямку E_{ext} . Внутрішній спіновий дисбаланс робить струми Холла двох зарядів асиметричними та створює напругу Холла для не магнітів, хоча два струми заряду Холла скасовуються і напруга Холла не розвивається, розсіювання, залежне від спіну, все ще створює «спінові» струми вгору та вниз (потік спінів), які течуть у протилежних напрямках, доки SOI не зникає. Таким чином, ми очікуємо ефект Холла виключно зі спіном, який називається спіновим ефектом Холла (СЕХ). Схематичний вигляд СЕХ показаний на рис. 2.3. Коли спіновий струм Холла виникає внаслідок розсіювання електронів на домішкових потенціалах із взаємодією SO, ефект можна назвати «зовнішньою» СЕХ [11, 12].

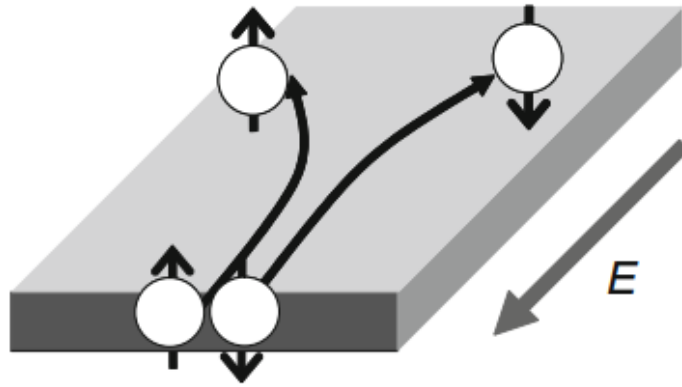


Рисунок 2.3 – Схематичний вигляд спінового ефекту Холла

Як і у випадку АЕХ, можна уявити власну СЕХ в не магнітах, до яких не прикладено зовнішнє магнітне поле. Мураками та ін. [13] передбачили для напівпровідників р-типу, що ефективне магнітне поле, що виникає з фази Беррі, змушує електрони зі спіном вгору та вниз дрейфувати в протилежних напрямках і призводить до СЕХ. SOI, який існує універсально в будь-яких матеріалах, також може виробляти внутрішню СЕХ навіть для напівпровідників n-типу. Сінова та ін. [14] передбачили постійну спінову холлівську провідність $e/8\pi$ для 2DEG з SOI типу Рашби, спричиненою асиметрією потенціалу. Внутрішня СЕХ є результатом притаманної властивості, тобто рівномірного SOI, матеріалу, на відміну від зовнішньої СЕХ, спричиненої розсіюванням. Хоча СЕХ не супроводжує напругу Холла, можна очікувати, що спінова поляризація протилежних знаків з'являється на краях навіть за відсутності прикладених магнітних полів, незалежно від зовнішньої або внутрішньої СЕХ. У нерівноважному стані потоки електронів зі спіном вгору та вниз у протилежних напрямках компенсуються спін-фліп-розсіюванням, спричиненим самою взаємодією SO або іншим спін-залежним розсіюванням, і призводять до накопичення спіну на краях зразків.

СЕХ має практичне значення для галузі спінтроніки, де спінова поляризація, маніпуляції та виявлення є важливими. Теоретичні дослідження, щоб зв'язати СЕХ з вимірюваними величинами, такими як спінове накопичення та оптична сигнатура, дуже бажані, оскільки навіть якщо спіновий струм Холла сам по собі є внутрішнім,

стаціонарне спінове накопичення є результатом балансу між спіновим струмом Холла та внутрішніми/зовнішніми ефектами струму.

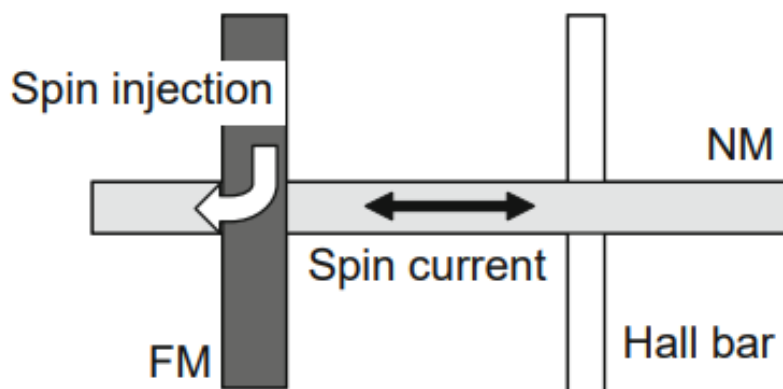


Рисунок 2.4 – Експериментальна установка для вимірювання зворотної СЕХ

Нещодавно квантована СЕХ запропонована теоретично для нелегованого графену за відсутності зовнішнього магнітного поля через зазор, створений SOI [15, 16]. СЕХ спостерігається не тільки в напівпровідниках, але також у звичайних металах і перехідних металах, оскільки існує SOI. Valenzuela та Tinkham [17] і Kimura та ін. [18] повідомили про вимірювання зворотної СЕХ в Al та Pt відповідно. Вони інжектували спін-поляризований струм у вузький немагнітний металевий пристрій, який схематично показаний на рис. 2.4. Інжектований струм викликає спін-залежний зсув хімічного потенціалу. Оскільки зсув хімічного потенціалу зменшується зі збільшенням відстані від точки спінової ін'єкції, індукується струм Холла. Просторова залежність хімічних потенціалів зі спіном вгору і зі спіном вниз мають протилежні знаки, а холлівські струми зі спіном вгору і вниз течуть в протилежних напрямках. Це означає, що спіновий струм Холла індукується спіновою ін'єкцією в не магнітні метали.

Розвиток технологій дозволив створити на основі виявленого ефекту компактний пристрій – датчик Холла. Головною перевагою датчиків Холла є те, що частота спрацьовування пристрою збігається з моментом вимірювання. Вихідний сигнал від такого датчика завжди стійкий, без сплесків та коливань амплітуди.

Датчик Холла може бути як аналоговим так і цифровим. У свою чергу цифрові, могут бути біполярні та уніполярні.

Датчики струму широко використовуються в різних сферах застосування. Поширеною технікою є вимірювання резистивного струму, коли падіння напруги на шунтовому резисторі вимірюється для визначення невідомого струму. Рішення на основі шунтових резисторів не забезпечують гальванічної розв'язки та не є енергоефективними, особливо при вимірюванні великих струмів.

Датчик струму на ефекті Холла забезпечують вищий рівень безпеки завдяки своїй гальванічній розв'язці між датчиком і струмом, який потрібно виміряти. Це також дозволяє уникнути значного розсіювання потужності на шунтуючому резисторі, який використовується в методах вимірювання резистивного струму.

Структура датчика струму з відкритим контуром на основі ефекту Холла показана на рис. 2.5.

Струм, який потрібно виміряти, протікає через провідник, який знаходиться всередині магнітного сердечника. Таким чином струм створює магнітне поле всередині сердечника. Це поле вимірюється датчиком Холла, розміщеним у повітряному зазорі сердечника.

Вихідний сигнал датчика Холла є напругою, пропорційною магнітному полю сердечника, яка також пропорційна вхідному струму. Сигнал, створений пристроєм Холла, зазвичай обробляється схемою формування сигналу. Схема формування сигналу може бути простим каскадом підсилення або більш складною схемою, призначеною для усунення похибки дрейфу пристрою Холла тощо.

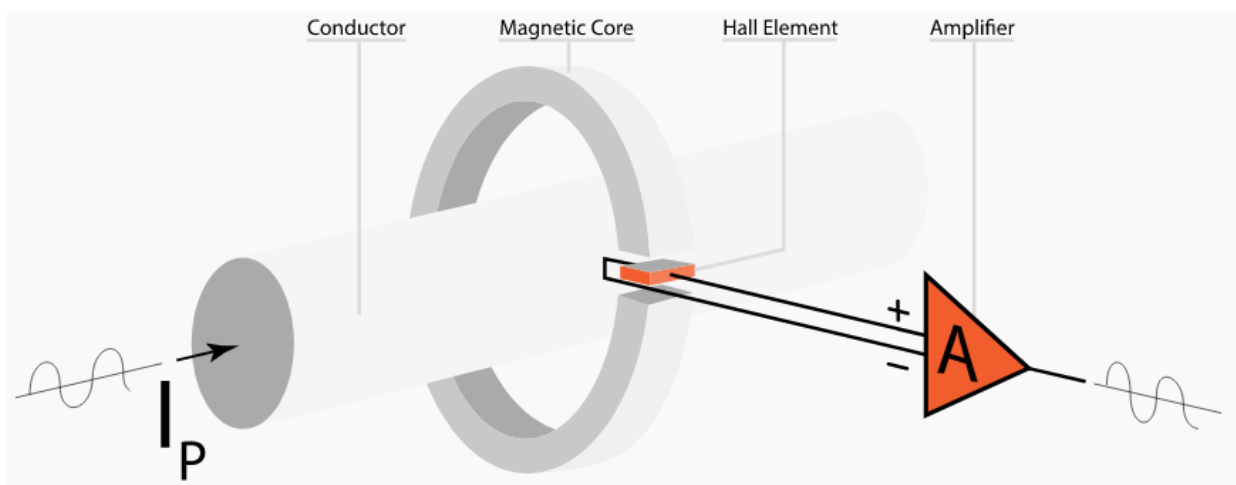


Рисунок 2.5 – Структура схема вимірювання струму з відкритим контуром

Навіщо нам потрібен магнітний сердечник? Припустимо, що магнітопровода немає. Магнітне поле на відстані r від нескінченно довгого прямого провідника, по якому тече електричний струм I , визначається за формулою 2.5, де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/м – проникність вільного простору.

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}. \quad (2.5)$$

Для $I = 1$ А, $r = 1$ см отримуємо:

$$B = 2 \cdot 10^{-5} \text{Т} = 0,2 \text{ Гс}. \quad (2.6)$$

Щоб зрозуміти, наскільки мале це магнітне поле, звернемо увагу, що магнітне поле Землі становить близько 0,5 Гауса. Отже, дуже складно виміряти струм 1 А, відчуваючи магнітне поле, яке він створює у вільному просторі. Для боротьби з цією проблемою ми можемо використовувати магнітний сердечник, щоб обмежити та спрямувати магнітне поле, створюване струмом. Сердечник забезпечує шлях високої проникності для магнітного поля та діє як концентратор поля. Магнітне поле всередині осердя може бути в сотні чи тисячі разів більше, ніж те, що даний струм може створити у вільному просторі.

Як показано на рис. 2.5, магнітопровід має повітряний зазор, у якому розміщено датчик Холла. Повітряний зазор може призвести до явища краєвого потоку, коли деякі лінії потоку відхиляються від своєї прямої траєкторії отже, не проходять через датчик, як очікувалося. Цей ефект показаний на рис. 2.6.

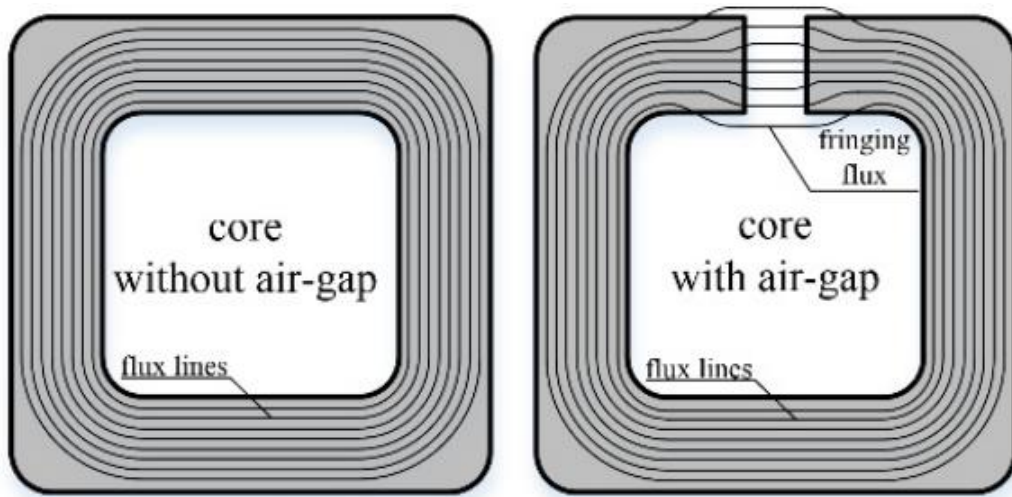


Рисунок 2.6 – Візуалізація краєвих магнітних потоків

Через цей ефект щільність магнітного потоку, яку фіксує пристрій Холла, може бути меншою, ніж щільність магнітного потоку всередині сердечника. Іншими словами, повітряний зазор може зменшити ефективність сердечника при перетворенні первинного струму в сильне магнітне поле. Однак, якщо довжина зазору мала порівняно з площею поперечного перерізу зазору, ефект може бути відносно невеликим.

Нам потрібен повітряний зазор, щоб мати можливість виміряти магнітне поле всередині сердечника. Крім того, повітряний зазор дозволяє нам змінювати загальний опір сердечника. Сильний струм може створити велике магнітне поле всередині сердечника і наситити його. Це може обмежити максимальний струм, який можна виміряти. Регулюючи довжину повітряного зазору, ми можемо змінити рівень насичення сердечника. На рис. 2.7 показано, як змінюється вимірювана щільність магнітного потоку залежно від довжини повітряного зазору для даного сердечника.

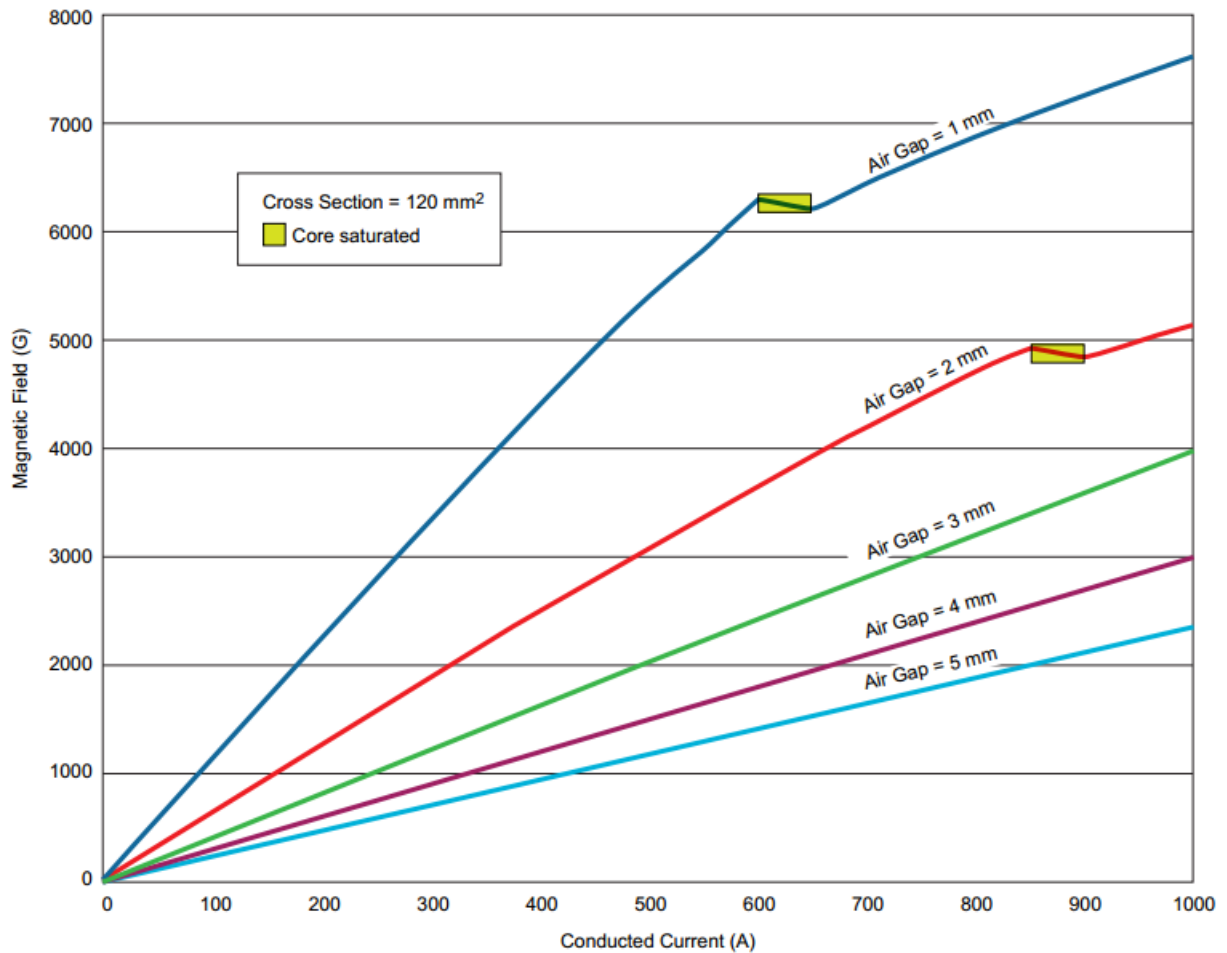


Рисунок 2.7 – Залежність магнітного потоку від повітряного зазору

З меншими повітряними проміжками ми можемо досягти більшого магнітного підсилення (підсилення гауса на ампер). Однак менший повітряний зазор може призвести до насичення сердечника при відносно меншому струмі. Отже, довжина зазору безпосередньо впливає на максимальний струм, який можна виміряти. На додаток до довжини зазору існують інші фактори, такі як матеріал сердечника, розміри сердечника та геометрія сердечника, які визначають ефективність магнітного сердечника.

У конфігурації з відкритим контуром неідеальні ефекти, такі як лінійність і похибка підсилення, можуть впливати на точність вимірювання. Наприклад, якщо чутливість датчика змінюється з температурою, на виході з'явиться похибка, що залежить від температури. Крім того, при вимірюванні струму в розімкнутому контурі сердечник схильний до насичення. Більше того, зсув датчика Холла, а також коерцитивна сила ядра можуть сприяти похибкам.

Техніка вимірювання струму в замкнутому контурі за ефектом Холла показана на рис. 2.8.

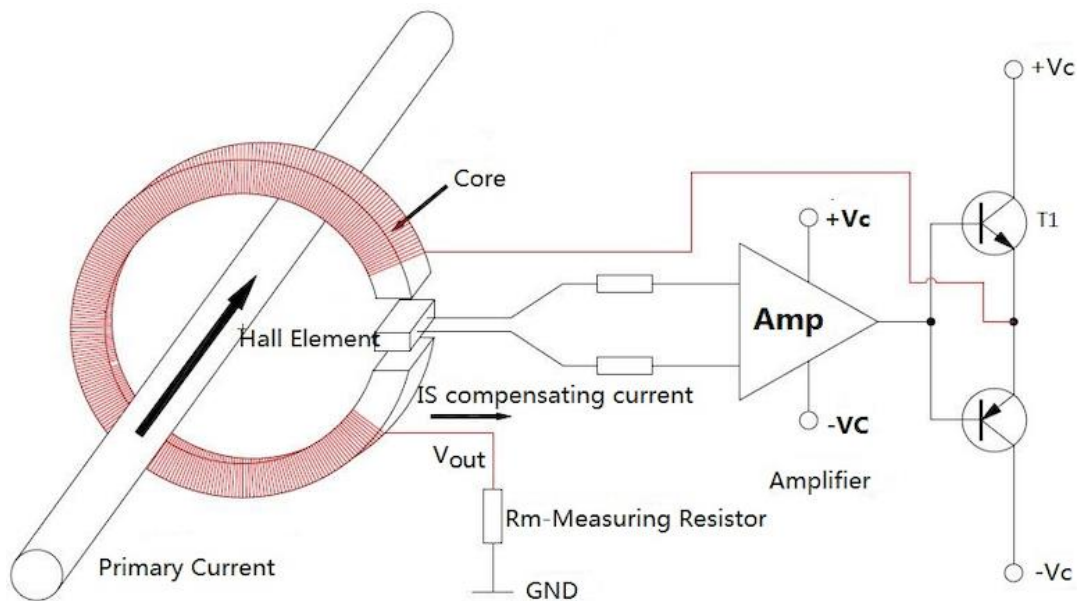


Рисунок 2.8 – Структура схема вимірювання струму з замкнутому контурі

Як випливає з назви, ця методика заснована на концепціях негативного зворотного зв'язку. У цьому випадку є вторинна обмотка, яка керується виходом зворотного зв'язку. Шлях зворотного зв'язку сприймає магнітне поле всередині осердя та регулює струм через вторинну обмотку так, щоб загальне магнітне поле осердя дорівнювало нулю.

Струм, який потрібно виміряти, проходить через первинний провідник і створює магнітне поле всередині сердечника. Це поле вимірюється датчиком Холла, розміщеним у повітряному зазорі сердечника. Вихідний сигнал датчика Холла, який є напругою, пропорційною магнітному полю сердечника, підсилюється та перетворюється на сигнал струму, який проходить через вторинну обмотку. Система розроблена таким чином, що струм, що проходить через вторинну обмотку, створює магнітне поле, яке протистоїть магнітному полю первинного струму. При сумарному магнітному полі, що дорівнює нулю, ми повинні мати вираз 2.7:

$$N_p I_p = N_s I_s, \quad (2.7)$$

де N_p – кількість витків первинної обмотки;

– I_p – первинний струм;

– N_s – кількість витків вторинної обмотки;

– I_s – вторинний струм.

З рис. 2.8 ми маємо $N_p = 1$ та $V_{out} = R_m \cdot I_s$, виразимо звідси напругу виходу та отримаємо формулу (2.8).

$$V_{out} = R_m \cdot \frac{1}{N_s} \cdot I_p. \quad (2.8)$$

Це дає нам напругу, пропорційну первинному струму. Звернемо увагу, що коефіцієнт пропорційності, $1/N_s$ є функцією кількості витків і значення шунтового резистора. Кількість витків є постійною величиною, а резистори мають лінійну характеристику.

Негативний зворотний зв'язок, який використовується в архітектурі замкнутого циклу, дозволяє нам зменшити неідеальні ефекти, такі як нелінійність і похибку підсилення. Ось чому, на відміну від конфігурації з відкритим контуром, на архітектуру із замкнутим контуром не впливає дрейф чутливості датчика. Отже, замкнута конфігурація забезпечує вищу точність. Датчик струму із замкнутим контуром більш стійкий до насичення сердечника, оскільки щільність магнітного потоку всередині сердечника дуже мала.

З датчиком замкнутого циклу вторинна котушка активно керується підсилювачем високої потужності. Додаткові компоненти, що використовуються в архітектурі замкнутого циклу, призводять до більшої площі друкованої плати, більшого енергоспоживання, а також вищої ціни.

Проблема стабільності є ще одним недоліком датчика струму із замкнутим контуром. У конфігурації із замкнутим контуром нам потрібно вивести функцію регулювання системи та переконатися, що система стабільна. У нестабільній системі може спостерігатися перерегулювання або дзвін у відповідь на швидку зміну

вхідного струму. Щоб зробити замкнуту систему стабільною, зазвичай потрібно обмежити її пропускну здатність. Однак зменшення пропускну здатності системи може збільшити час відповіді та зробити систему нездатною реагувати на швидкі зміни вхідних даних. Зазвичай очікується, що конфігурація з відкритим контуром має швидший час відгуку.

Зауважимо, що зсув датчика Холла може сприяти помилкам як у замкнутому, так і в розімкненому контурі. Зсув якісного елемента Холла з антимоніду індію (InSb) зазвичай становить ± 7 мВ.

Варто зазначити, що сучасні датчики струму на основі ефекту Холла використовують інноваційні методи для усунення деяких із зазначених вище обмежень. Наприклад, DRV411 від Texas Instrument – це мікросхема формування сигналу, розроблена для додатків визначення струму із замкнутим контуром, яка використовує техніку обертання струму для усунення помилок зсуву та дрейфу елемента Холла.

3 РОЗРОБЛЕННЯ, ОБГРУНТУВАННЯ АЛГОРИТМУ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ

3.1 Розроблення алгоритму функціонування пристрою

Для наочного уявлення роботи інформаційно-вимірювального комплексу для обліку витрати електроенергії, нам потрібно перерахувати всі функції, які він повинен виконувати. Система, що розроблюється, повинна забезпечувати наступні функції:

- вимірювання змінного струму;
- вимірювання змінної напруги;
- автоматична передача показників у відповідний час;
- відлік часу;
- синхронізація часу з мережею;
- автономність протягом 40 діб;
- безпечне користування;
- зрозуміле керування;
- простий інтерфейс;
- перегляд денної спожитої електроенергії;
- перегляд нічної спожитої електроенергії;
- перегляд добової спожитої електроенергії;
- перегляд місячного споживання електроенергії;
- перегляд спожитої електроенергії протягом 3-х місяців.

На підставі перелічених функцій складемо блок-схему алгоритму роботи інформаційно-вимірювального комплексу для обліку витрати електроенергії. Схема алгоритму наведена на рис. 3.1.

При подачі живлення на вхід лічильника, на пристрої відображення інформації системи, повинна з'явитись первинна інструкція по налаштуванню системи, а саме IP-адреса автоматично розгорнутого серверу та поточні дані для

доступу до нього через технологію безпроводного зв'язку Wi-Fi. Такими даними є назва персональної точки доступу та пароль від неї.

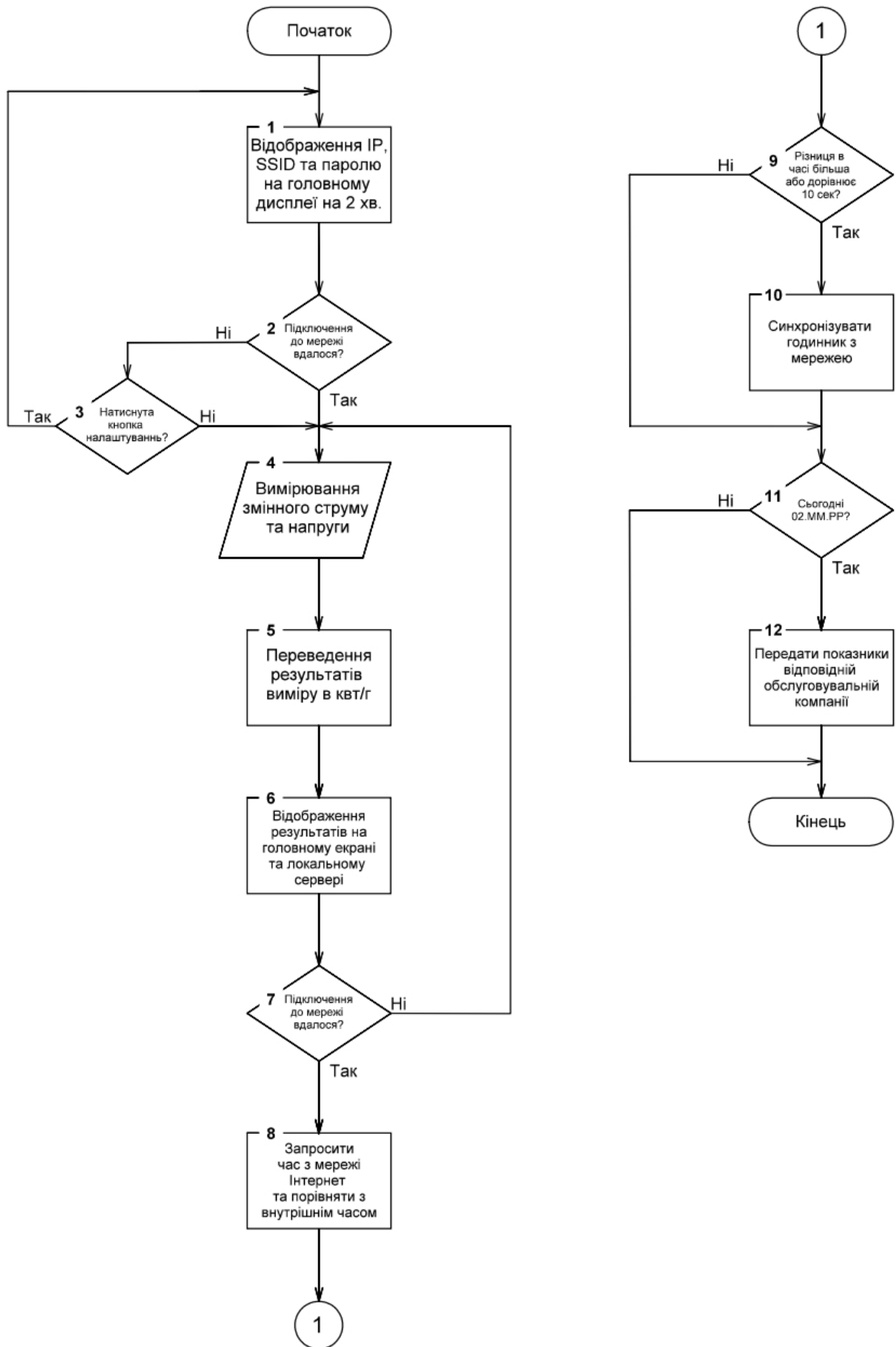


Рисунок 3.1 – Блок схема інформаційно-вимірального комплексу

Під час показу повідомлення з даними для входу на сервер, облік електроенергії вже відбувається, але не відображається на головному екрані. Після закінчення 2-х хвилин, на головному екрані з'явиться основний інтерфейс лічильника з відповідними полями. Якщо ж користувач не встиг виконати авторизацію або ж забув дані для входу, йому необхідно натиснути кнопку, яка поверне на екран інформацію для входу.

На розгорнутому сервері, приклад інтерфейсу якого зображений на рис. 3.2, користувач зможе ввести свій ідентифікатор в мережі власного постачальника електроенергії. Це необхідно, для того щоб система автоматично могла відправляти показники з лічильників у власний «особистий кабінет» користувача на сайті постачальника. Тут і полягає основна складність системи, так як кожен сайт для агрегації даних з лічильників має власну будова та різні get-запити для відправки даних, то користувачу треба заздалегідь повідомляти розробнику власного постачальника та при його зміні виконувати перепрошивку пристрою. Цю проблему можна вирішити шляхом відкриттям он-лайн сервісу, який би займався трансформацією даних для різних постачальників на основі їх сайту або розробник жорстко прив'язується лише до одного постачальника послуг.

Введіть відповідні дані:

<input type="text"/>	- SSID
<input type="text"/>	- Пароль
<input type="text"/>	- Ідентифікатор
<input type="button" value="Зберегти"/>	

Рисунок 3.2 – Приклад початкового інтерфейсу

Користувачу також необхідно ввести дані для доступу до мережі Інтернет, для цього на цьому ж сервері у відповідних полях «SSID» та «Пароль» йому необхідно ввести логін та пароль від власної точки доступу Wi-Fi відповідно.

Після натискання віртуальної кнопки на сервері, зміни внесені користувачем збережуться в пам'яті пристрою. На цьому сервері, також повинні бути продубльовані поля з лічильника, щоб користувач міг зі смартфона чи комп'ютера під'єднатись до лічильника і подивитись показники, які його цікавлять.

На пристрої відображення інформації та на розгорнутому сервері спожита електроенергія повинна відображатися в кіловат-годинах, як це потребує Закон України. Для зручності користувача, в інтерфейсі буде зонувий поділ на денний та нічний тариф, навіть якщо в користувача не буде підписаний договір про двійний тариф. Приклад користувацького інтерфейсу наведено на рис. 3.3.

00000000,0	12:30:50 25/09/22	
<hr/>		
00000000,0 - День	00000000,0 - Доба	
00000000,0 - Ніч		
000000000 - Попередній переданий показник		
<hr/>		
Тиждень	Місяць	3 Місяці
00000000,0	00000000,0	00000000,0

Рисунок 3.3 – Приклад користувацького інтерфейсу лічильника на сервері

За вимогою законодавства та регулюючих документів, час на лічильниках даного типу повинен мати точний хід, з розбіжністю з еталонним лише на ± 10 секунд. Для забезпечення необхідною точності, необхідна періодична перевірка з часом мережі. В системі обліку електроенергії буде стояти мікросхема точного часу з власним резервним живленням, навіть при вимкненні основного живлення та зникненні зв'язку з мережею інтернет, час буде продовжувати свій відлік, а при відновленні зв'язку – відразу ж синхронізація з еталонним часом.

При настанні часу відправки показників, а саме в період перших трьох днів початку місяця, система автоматично відправить показники на сервер постачальника послуг.

3.2 Розробка структурної схеми пристрою

Згідно з технічного завдання, необхідно розробити систему, яка реалізує інформаційно-вимірювальний комплекс для обліку витрати електроенергії в квартирі. Система повинна бути надійною, зручною і в той же час безпечною.

Інформаційно-вимірювальний комплекс повинен забезпечувати виконання наступних функцій:

- вимірювання змінного струму;
- вимірювання змінної напруги;
- трансформація показників, для кращого розуміння користувачем;
- точне відображення часу;
- безпроводний зв'язок з мережею інтернет;
- синхронізація часу з мережею, у випадку неточного ходу годинника;
- автоматична передача показників у відповідний час, на сервер надавача послуг електропостачання;
- мінімальне налаштування користувачем;
- автономність протягом 40 діб;
- простий інтерфейс;
- перегляд денної спожитої електроенергії;
- перегляд нічної спожитої електроенергії;
- перегляд добової спожитої електроенергії;
- перегляд місячного споживання електроенергії;
- перегляд спожитої електроенергії протягом 3-х місяців.

Варто відмітити, що для повного розкриття потенціалу системи – необхідне з'єднання з мережею інтернет але воно не є обов'язковим. Так як система має в своїй будові пристрій для відображення інформації, показники можуть бути зняті й класичним методом – за допомогою відповідальної особи. Також, так повелося, що лічильники електроенергії часто розміщують в електричних щитах, де розведена різна автоматика і запобіжники, вони зроблені у вигляді металічної коробки яка погано пропускає сигнал 2.4 ГГц, на якій працює безпроводний прийомо-передатчик

Wi-Fi. Якість сигналу можна перевірити спеціальними пристроями або ж стандартним інструментарієм звичайного маршрутизатору. На цей випадок, коли сигнал проходить погано, потрібно передбачити в системі виносну антену.

На основі перерахованого вище, наведемо структурну схему інформаційно-вимірювального комплексу на рис. 3.4.



Рисунок 3.4 – Структурна схема інформаційно-вимірювального комплексу

На нинішній час, можна часто зустріти об'єднання блоку EEPROM з мікроконтролерним блоком або ж об'єднання датчиків з аналого-цифровими перетворювачами в одному корпусі. Для наших цілей, такий принцип буде ідеальним рішенням, так як зменшення окремих блоків зможе покращити ремонтпридатність та час потенційного ремонту у випадку поломки. Таким же принципом будемо керуватися при виборі решти елементів.

Автономність системи повинна забезпечуватись протягом 40 діб при повній зарядці акумуляторної батареї. Для реалізації цього, блок живлення повинен мати функцію наскрізної зарядки, тобто при зарядці батареї, паралельно повинна житись основна система.

4 ВИБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ

4.1 Вибір мікроконтролера

4.1.1 Платформа Arduino Nano.

Arduino Nano – зручна платформа для розробки та макетування невеликого розміру, яка входить до п'ятірки лідерів за популярністю серед розробників. Її зовнішній вигляд зображений на рис. 4.1, а її принципова схема на рис. 4.2. Незважаючи на свій невеликий фізичний розмір, вона практично нічим не поступається своїй старшій моделі Arduino Uno за функціоналом.

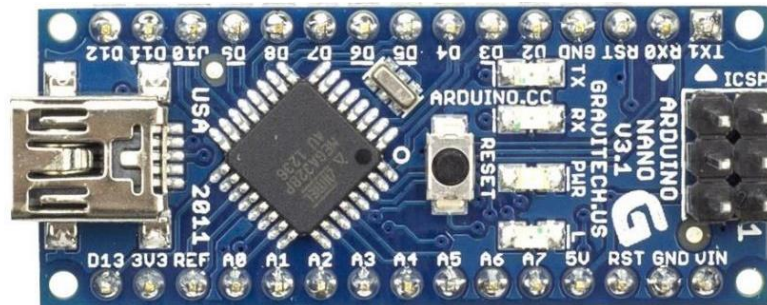


Рисунок 4.1 – Arduino Nano

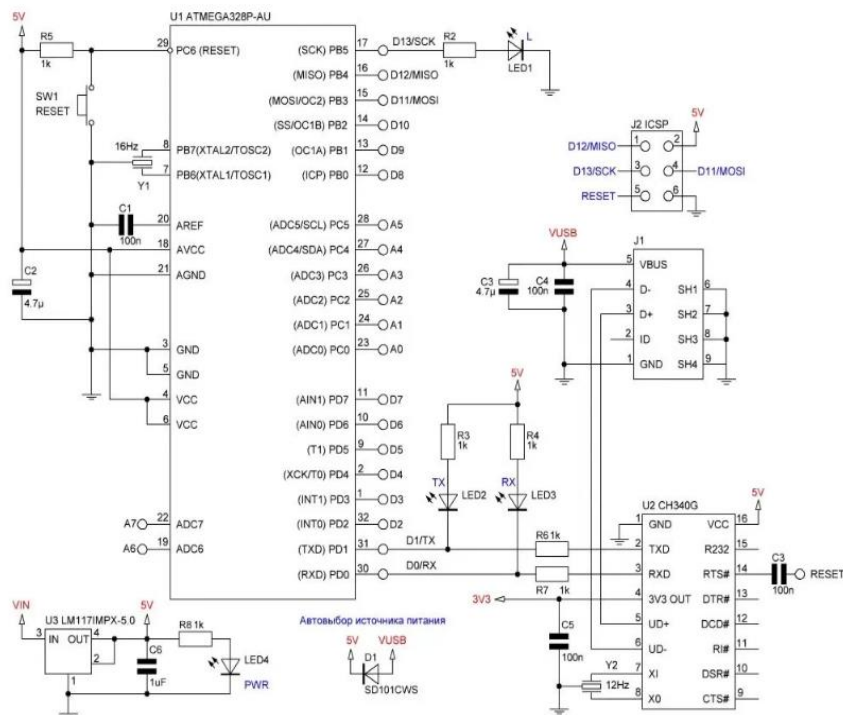


Рисунок 4.2 – Принципова схема платформи Arduino Nano

Платформа Arduino Nano, побудована на базі 8-ми бітного мікроконтролера ATmega328, має невеликі розміри, що дозволяє використовувати її в компактних пристроях. Наведемо основні характеристики платформи в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Основні характеристик Arduino Nano

Категорія	Параметр
Мікроконтролер	ATmega328P, 8-бітний AVR на частоті 16 МГц;
Пам'ять	Flash – 30 кбайт
	SRAM – 2 кбайт
	EEPROM – 1 кбайт
Порти	Загальна кількість портів введення-виводу – 20
	3 АЦП – 8
	3 ШІМ – 6, 8-біт
Інтерфейси	SPI
	I ² C / TWI
	UART / Serial
Потужність	Номінальна робоча напруга – 5 В
	Допустима напруга – від 7 до 12В
	Максимальний струм – 800 мА

Платформа Arduino Nano може живитись через підключення до порту Mini-B USB, від нерегульованого від 7В до 12В або регульованого 5 В зовнішнього джерела живлення, через виводи 30 та 27 відповідно. При підключенні декількох джерел живлення, автоматично обирається джерело з найвищою напругою.

Мікросхема CH340G, яка являє собою USB-UART <-> USB-TTL конвертер, отримує живлення тільки якщо сама платформа живитися від порту Mini-B USB. Таким чином при роботі від зовнішнього джерела, буде відсутня напруга 3,3В, що генерується мікросхемою CH340G, при цьому світлодіоди RX і TX блиматимуть тільки при наявності сигналу високого рівня на пінах 0 та 1.

Кожен із 14 цифрових пінів Nano, використовуючи функції в середовищі розробки: `pinMode()`, `digitalWrite()` та `digitalRead()` – може налаштовуватися як вхід

або вихід. Напруга на пінах Arduino Nano працюють в діапазоні від 0В до 5 В, в залежності від налаштування керуючої програми. Кожен вихід має резистор навантаження (стандартно відключений) від 20 до-50 кОм і може пропускати до 40 мА, він необхідний для програмно-керованого підтягування пінів до GND або VCC.

Деякі виходи мають особливі функції:

- RX та TX. Піни використовуються для отримання та передачі даних TTL. Ці піни підключені до відповідних виходів мікросхеми послідовної шини FTDI USB-to-TTL;
- зовнішнє переривання. Дані піни можуть бути налаштовані на виклик переривання на низькому значенні сигналу, по передньому або задньому фронтах або при зміні значення;
- I2C. SDA та SCL. За допомогою цих пінів здійснюється зв'язок I2C. Для створення використовується бібліотека Wire;
- AREF. Опорна напруга аналогових входів;
- RESET. Низький рівень сигналу на виводі перезавантажує мікроконтролер.

Платформі Arduino Nano має в своїй будові 8 аналогових входів, кожен з роздільною здатністю в 10 біт. Стандартно, піни мають діапазон виміру до 5В щодо землі, проте є можливість змінити верхню межу за допомогою програмних функцій.

На платформі Arduino Nano встановлено кілька пристроїв здійснення зв'язку з комп'ютером, іншими пристроями Arduino або мікроконтролерами. ATmega168 і ATmega328 підтримують послідовний інтерфейс UART TTL, здійснюваний пінами RX і TX. Встановлена на платі мікросхема FTDI CH340G спрямовує цей інтерфейс через USB, а драйвери FTDI (включені до Arduino) надають віртуальний COM порт програмі на комп'ютері. Моніторинг послідовної шини (Serial Monitor) програми Arduino дозволяє надсилати та отримувати текстові дані при підключенні до платформи. Світлодіоди RX і TX на платформі будуть блимати під час передачі даних через мікросхему FTDI або USB підключення

Мікроконтролери ATmega168 і ATmega328 поставляються вже з встановленим завантажувачем, що полегшує запис нових програм без використання зовнішніх програматорів. Зв'язок здійснюється за допомогою протокола STK500.

4.1.2 ESP07-S.

Модуль WiFi ESP-07S розроблений компанією Ai-Thinker Technology. Ядро процесора ESP8266, інтегроване в провідний у галузі мікроконтролер Tensilica L106 з наднизьким енергоспоживанням. Модуль має невеликий корпус з 32-розрядним та 16-розрядним режимом роботи, працює на частоті 160 МГц і 80 МГц відповідно, підтримує RTOS та інтегрований Wi-Fi MAC /BB/RF/PA/LNA.

Модуль WiFi ESP-07S підтримує стандартний протокол IEEE802.11 b/g/n, повний стек протоколів TCP/IP. Розробники можуть використовувати цей модуль для додавання мережеских можливостей до існуючих пристроїв або для створення окремих мережеских контролерів. ESP8266 – це високопродуктивний бездротовий SOC, який пропонує максимальну корисність за найнижчою ціною та необмежені можливості для вбудовування функцій WiFi в інші системи, його внутрішня функціональна блок-діаграма зображена на рис. 4.3.

Модуль Wi-fi, який застосовано в цьому модулі дозволяє підключатись до мережі, запускати власну точку доступу та їх симбіоз – одночасно бути підключеним до мережі та розгортати власну точку доступу. Ця можливість дає будувати цілі мережі зв'язаних між собою пристроїв.

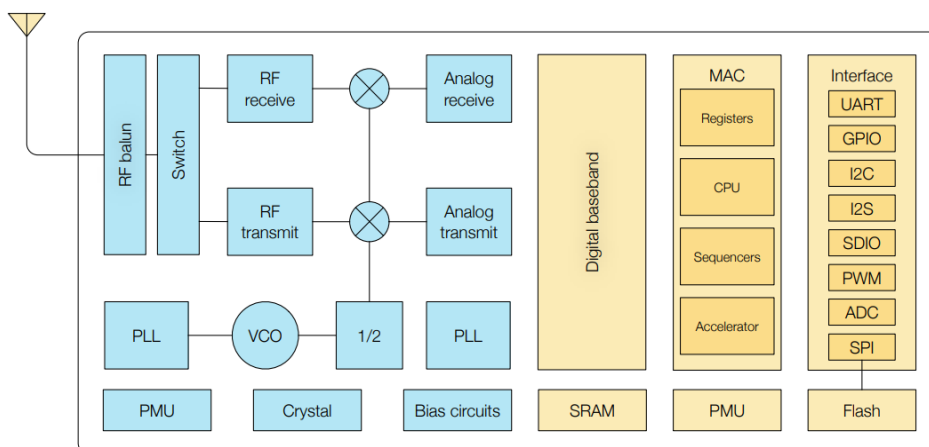


Рисунок 4.3 – Функціональна блок-діаграма ESP07-S

ESP8266 – це повне та автономне мережеве рішення WiFi, яке може працювати незалежно або як керований пристрій, що працює на інших хостах

мікроконтролера. ESP8266 здатний завантажуватися безпосередньо із зовнішньої флеш-пам'яті, коли він працює від програми і є єдиним процесором програми в пристрої. Вбудований кеш допомагає підвищити продуктивність системи та зменшити вимоги до пам'яті.

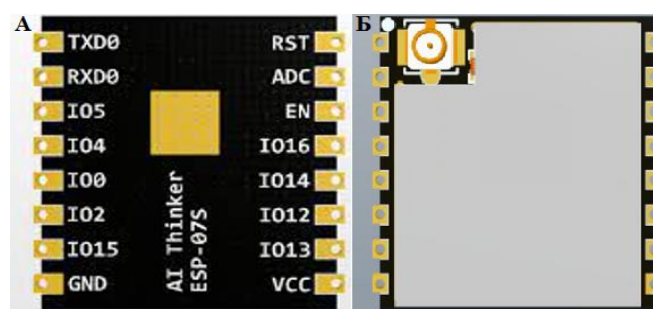
Кожен керований вхід або вихід платформи можна підтягнути до GND або VCC, або взагалі встановити високий імпеданс на ньому. Панелі введення-виведення є дво-направленими, не інвертуючими і три-станними, що включає вхідний і вихідний буфер з керуючими входами в трьох станах.

Мікроконтролер відноситься до класу енергоефективних, живиться від джерела живлення від 2,5 В до 3,6 В, споживаючи при цьому близько 80 мА, за умови програмно вимкненого Wi-Fi.

В ESP07-S інтегрований 32-розрядний процесор архітектури RISC AVR Tensilica L106, який завдяки своєму 40-нм технічному процесу забезпечує низьке енергоспоживання та високу тактову частоту, яка досягає 160 МГц.

ESP07-S має інтегрований в кристалі Wi-Fi, контролер пам'яті та блоки пам'яті, включаючи SRAM і ROM. Завдяки цьому, CPU може отримати доступ до блоків пам'яті через інтерфейси iBus, dBus і АНВ. До всіх блоків пам'яті системи можна отримати доступ за запитом, тоді контролер пам'яті формує конвеєрну черга відповідно до часу виконання, коли ці запити отримані процесором.

Якщо поставлена задача перевищує можливості даного модуля, його можна використовувати як прийомо-передатчик бездротового сигналу типу Wi-Fi. Що стосується завдання адаптера WiFi, його можна додати до будь-якої конструкції на основі мікроконтролера, що підтримує інтерфейс SPI/SDIO або має в своїй будові порт I2C/UART.



А – нижня частина, Б – верхня частина

Рисунок 4.4 – Зовнішні рендери ESP07-S

Потужні вбудовані можливості обробки та зберігання ESP8266 дозволяють інтегрувати датчики та інші спеціальні пристрої через порт GPIO, мінімізуючи системні ресурси під час мінімальної попередньої розробки та експлуатації. Зовнішній вигляд модуля ESP07-S зображений на рис. 4.4.

Видно, що модуль має цілих 16 пінів взаємодії, кожен з яких має певні особливості, перерахуємо їх всі та занесемо дані в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Піни ESP12-E

Номер піву	Назва піву	Функціональне пояснення
1	RST	Пін скидання
2	ADC0	АЦП, вхідна напруга 0~1В, діапазон значень 0~1024
3	EN	Пін з підтримкою мікросхеми
4	IO16	Пін для виходу з Deep Sleep Mode
5	IO14	HSPI_CLK
6	IO12	HSPI_MISO
7	GPIO13	HSPI_MOSI, UART0_CTS
8	VCC	Пін блоку живлення модуля, напруга 3,0 В ~ 3,6 В
9	GND	Нуль
10	IO15	MTDO; HSPICS; UART0_RTS
11	IO02	UART1_TXD
12	IO0	HSPI_MISO; I2SI_DATA
13	IO4	GPIO4
14	IO5	IR_R
15	RXD	UART0_RXD
16	TXD	UART0_TXD

Відповідно до нашої поточної версії SDK, доступний для користувачів простір SRAM призначається:

- розмір оперативної пам'яті – 50 КБ, тобто коли ESP8266 працює в режимі станції та під'єднується до маршрутизатора, максимальний програмований простір, доступний у розділі Heap + Data, становить приблизно 50 КБ;
- в кристалі немає програмованого ПЗУ. Таким чином, програма користувача повинна зберігатися у зовнішньому SPI Flash.

Модуль ESP07-S, в залежності від програмного коду та задач поставлених на виконання, має в своєму розпорядженні три енергетичні сценарії використання, які можуть змінювати один одного в певні часові проміжки.

Енергетичний профіль Modem-sleep застосовується, коли працюють такі складові системи як широтно-імпульсна модуляція або протокол зв'язку I2C. У випадках, коли з'єднання Wi-Fi підтримується і передача даних не потрібна, схему модему Wi-Fi можна вимкнути для економії енергії відповідно до стандартів 802.11 (таких як U-APSD). Наприклад у DTIM3, коли ESP8266EX перебуває в режимі сну протягом 300 мс і прокидається протягом 3 мс, щоб отримати пакети від точки доступу, загальне середнє споживання струму становить близько 20 мА.

Енергетичний профіль Light-sleep використовується для програм, процесор яких може бути призупинено, наприклад перемикач Wi-Fi. У випадках, коли з'єднання Wi-Fi зберігається і передача даних не потрібна, ланцюг Wi-Fi-модему та CPU можна вимкнути для економії енергії відповідно до стандартів 802.11 (таких як U-APSD). Наприклад у DTIM3, коли ESP8266EX перебуває в режимі сну протягом 300 мс і прокидається протягом 3 мс, щоб отримати пакети від точки доступу, загальне середнє споживання струму становить близько 2 мА.

Енергетичний профіль Deep-sleep призначений для програм, які не потребують з'єднання Wi-Fi і передають дані лише з тривалими затримками, наприклад, датчик температури, який вимірює температуру кожні 100 с. Наприклад коли ESP8266EX перебуває в режимі сну протягом 300 с, а потім прокидається для підключення до точки доступу (приблизно 0,3 ~ 1 с), загальне середнє споживання

струму набагато менше 1 мА. При напрузі 2,5 В отримано струм споживання близько 20 мкА.

Коротко прорезюємо сильні сторони модулю ESP07-S:

- найменший модуль 802.11b/g/n Wi-Fi SOC;
- потужний 32-розрядний процесор;
- тактова частота до 160 МГц;
- вбудований 10-бітний високоточний АЦП;
- підтримує UART/GPIO/ІС/PWM/ADC;
- підтримка кількох режимів сну. Низький струм глибокого сну до 20 мкА;
- інтегрований Wi-Fi MAC/BB/RF/PA/LNA, характеристики якого наведені в табл. 4.3;
- швидкість передачі UART до 4 Мбіт/с;
- підтримує режим роботи STA/AP/STA + AP;
- підтримка технології Smart Config/AirKiss;
- підтримує дистанційне оновлення мікропрограми (FOTA).

Таблиця 4.3 – Параметри Wi-Fi на ESP-12E

Опис	Мін.	Тип.	Макс.	Одиниці вимірювання
1	2	3	4	5
Вхідна частота	2400	-	2483.5	МГц
Коефіцієнт відбиття	-	-	-10	дБ
Вихідна потужність				
Вихідна потужність на 72,2 Мбіт/с	15.5	16.5	17.5	дБм
Вихідна потужність в режимі 11b	19.5	20.5	21.5	дБм
Чутливість				
Модуляція ССК, 1Мбіт/с		-90		дБм
Модуляція ССК, 11Мбіт/с		-85		дБм
6 Мбіт/с (1/2 BPSK)		-88		дБм

Продовження табл. 4.3

1	2	3	4	5
54 Мбіт/с (3/4 64-QAM)		-70		дБм
HT20, MCS7 (65 Мбіт/с, 72,2 Мбіт/с)		-67		дБм
Відхилення сусіднього каналу				
OFDM, 6 Мбіт/с		37		дБ
OFDM, 54 Мбіт/с		21		дБ
HT20, MCS0		37		дБ
HT20, MCS7		20		дБ

Перераховані вище характеристики модуля, свідчать про те, що він ідеально підійде для виконання проекту. Він має маленькі розміри, достатню продуктивність, низьке споживання електроенергії, та має в своїй будові wi-fi передавач.

4.2 Модуль реального часу

4.2.1 DS1302.

Модуль реального часу DS1302 [20] містить годинник/календар реального часу та 31 байт статичної оперативної пам'яті. Його зовнішній вигляд зображений на рис. 4.5. Він спілкується з мікропроцесором через простий послідовний інтерфейс. Годинник/календар реального часу надає інформацію про секунди, хвилини, години, день, дату, місяць і рік. Кінцева дата місяця автоматично коригується для місяців, у яких менше 31 дня, включаючи поправки для високосного року. Годинник працює в 24-годинному або 12-годинному форматі з індикатором АМ/РМ.

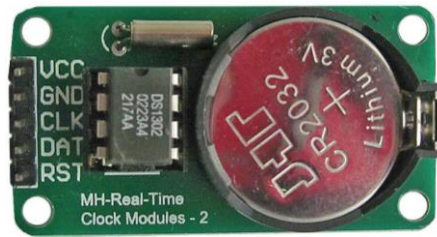


Рисунок 4.5 – Зовнішній вигляд DS1302

Взаємодія DS1302 із мікропроцесором спрощується завдяки використанню синхронного послідовного зв'язку. Для зв'язку з годинником та оперативною пам'яттю потрібні лише три дроти: CE, I/O і SCLK. Дані можуть бути передаватись як з годинника так і в нього, для встановлення нового часу по 1 байту за раз або пакетом до 31 байта. DS1302 розроблено для роботи з дуже низьким споживанням електроенергії та зберігання даних та інформації про годинник.

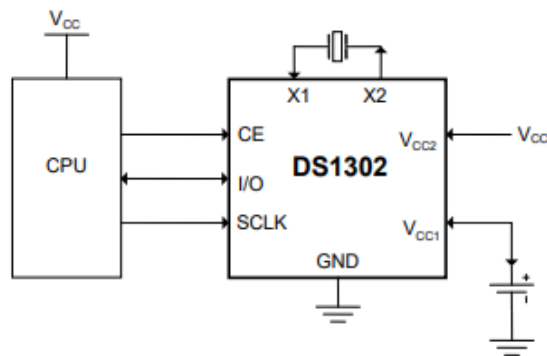


Рисунок 4.6 – Типова робоча схема модуля DS1302

DS1302 це оновлена модель попереднього модуля реального часу DS1202. На додаток до основних функцій вимірювання часу DS1202, DS1302 має додаткові функції, такі як подвійні контакти живлення для основного та резервного джерел живлення, крапельне зарядження при під'єднанні акумуляторної батареї та сім додаткових байт пам'яті блокнота. На рис. 4.6 показана типова схема підключення модуля до мікропроцесора.

Тепер розглянемо поближче сам модуль DS1302, на рис. 4.7 зображена його блок діаграма, а саме регістр зсуву, логіка керування, генератор, годинник реального часу та оперативна пам'ять.

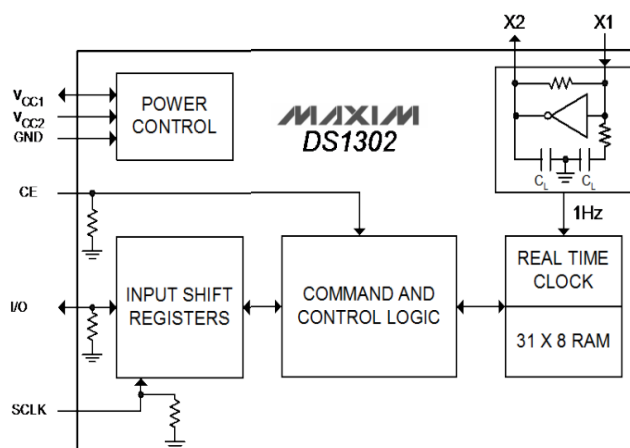


Рисунок 4.7 – Блок діаграма модуль реального часу DS1302

Перерахуємо піни та їх функціональні навантаження:

- V_{CC2} . Основний контакт джерела живлення в конфігурації подвійного джерела живлення. V_{CC1} підключається до резервного джерела для підтримки часу та дати за відсутності основного живлення.. Коли V_{CC2} перевищує $V_{CC1} + 0,2$ В, V_{CC2} живить DS1302. Коли V_{CC2} менше V_{CC1} , V_{CC1} живить DS1302;
- V_{CC1} . Робота в режимі низького енергоспоживання в системах з одним джерелом живлення та системами, що працюють від батареї. У системах, які використовують зарядний пристрій для крапельної зарядки, джерело енергії, що перезаряджається, підключається до цього контакту;
- CE. Вхід. Сигнал CE має бути високим під час читання або запису. Цей пін має внутрішній резистор 40 кОм підтягнутий до землі;
- I/O. Вхід/Вихід. Пін I/O є двонаправленим контактом даних для 3-провідного інтерфейсу. Цей пін має внутрішній резистор 40 кОм підтягнутий до землі;
- SCLK. Вхід SCLK використовується для синхронізації руху даних по послідовному інтерфейсі. Цей пін має внутрішній резистор 40 кОм підтягнутий до землі;

- X2/X1. Піни для підключення стандартного кварцевого кристала 32,768 кГц. Внутрішній генератор призначений для роботи з кристалом із заданою ємністю навантаження 6 пФ та ESR 45 кОм. У цій конфігурації висновок X1 підключений до сигналу зовнішнього генератора, а висновок X2 «плаває».

DS1302 використовує зовнішній кристал 32,768 кГц. Для роботи схеми генератора не потрібні зовнішні резистори або конденсатори. Вище наведено кілька параметрів кристала для зовнішнього кристала. На рис. 4.7 показана функціональна схема схеми генератора. Якщо використовується кристал із зазначеними характеристиками, час запуску зазвичай менше однієї секунди.

Точність годинника залежить від точності кристала та точності узгодження між ємнісним навантаженням контуру генератора та ємнісним навантаженням, для якого було налаштовано кристал. Додаткову похибку додасть дрейф частоти кристала, спричинений змінами температури. Шум зовнішнього ланцюга, поєднаний із ланцюгом генератора, може призвести до швидкої роботи годинника. На рис. 4.8 показане типове компонування РСВ для ізоляції кристала та генератора від шуму.

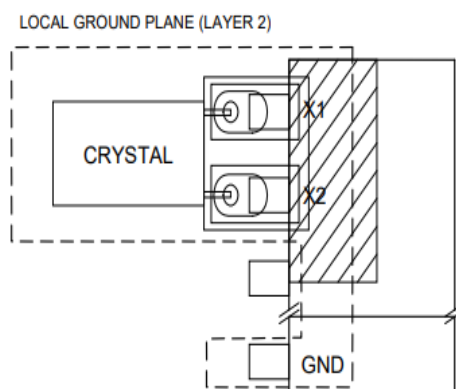


Рисунок 4.8 – Типове компанування РСВ для зменшення впливу шуму

4.2.2 DS1307.

DS1307 – це годинник/календар із низьким енергоспоживанням [21] і з 56 байтами SRAM, що живляться від акумулятора. Годинник/календар надає інформацію про секунди, хвилини, години, день, дату, місяць і рік. Дата в кінці місяця автоматично коригується для місяців, які містять менше 31 дня, включаючи

поправки на високосний рік. DS1307 працює як підлеглий пристрій на шині I2C. Доступ отримується шляхом виконання умови START і надання ідентифікаційного коду пристрою, а потім адреси реєстру. Доступ до наступних реєстрів можна здійснювати послідовно, доки не буде виконана умова STOP.

Коли напруга на пині VCC падає нижче $1,25 \cdot V_{BAT}$, пристрій припиняє поточний доступ і скидає лічильник адрес пристрою. Вхідні дані пристрою наразі не розпізнаються, щоб запобігти запису на пристрій помилкових даних із системи, що виходить за межі допуску. Коли VCC падає нижче VBAT, пристрій перемикається в режим резервного живлення від батареї з низьким струмом. Після ввімкнення живлення пристрій перемикається з батареї на VCC. Блок-схема на рис. 4.9 показує основні елементи послідовного RTC.

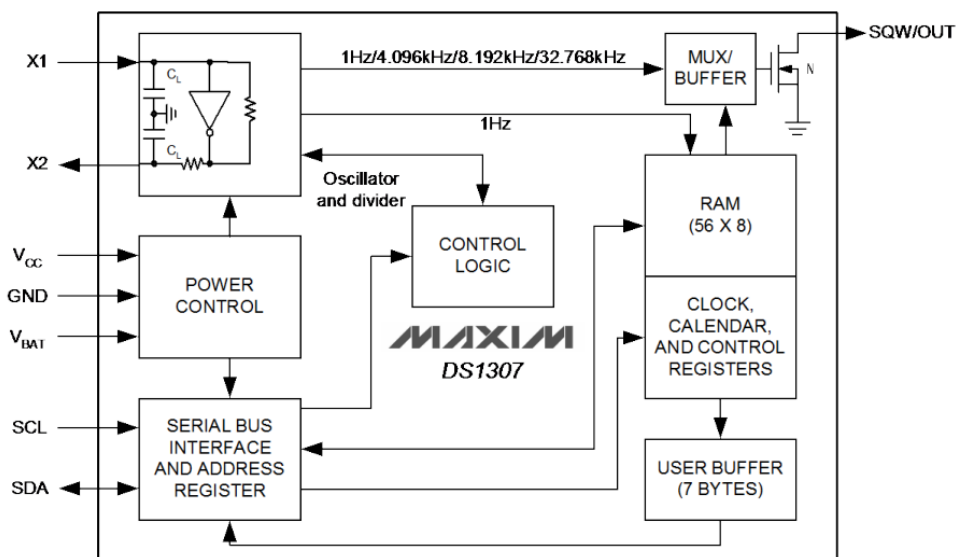


Рисунок 4.9 – Блок схема модуля ds1307

Послідовний годинник реального часу DS1307 це годинник/календар із повним двійковим десятковим кодуванням з 56 байтами NV SRAM. Зовнішній вигляд модуля зображений на рис. 4.10. Адреса та дані передаються послідовно через двонаправлену шину I2C. Годинник/календар надає інформацію про секунди, хвилини, години, день, дату, місяць і рік. Кінцева дата місяця автоматично коригується для місяців у яких менше 31 дня, включаючи поправки для високосного року. Годинник працює в 24-годинному або 12-годинному форматі з індикатором

AM/PM. DS1307 має вбудовану схему вимірювання живлення, яка виявляє зникнення основного живлення та автоматично перемикається на резервне джерело живлення. Функціонування хронометру продовжується, поки частина працює від резервного джерела живлення.

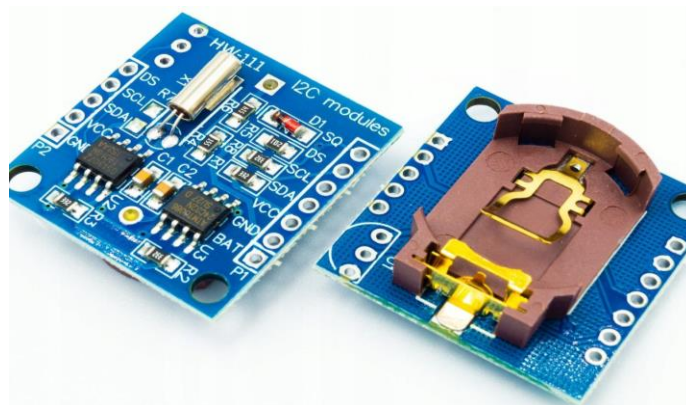


Рисунок 4.10 – Зовнішній вигляд DS1307

Перерахуємо піни та їх функціональні навантаження:

- X1/X2. Піни для підключення стандартного кварцового кристала 32,768 кГц. Внутрішня схема генератора розроблена для роботи з кристалом із заданою навантажувальною ємністю 12,5 пФ та ESR 45 кОм. X1 є входом для осцилятора і може бути додатково підключений до зовнішнього генератора 32,768 кГц. Вихід внутрішнього генератора X2 плаває, якщо зовнішній генератор підключений до X1;
- V_{CC}. Пін для підключення первинного джерела живлення. Коли напруга подається в межах норми, пристрій повністю доступний, а дані можна записувати та читати. Коли до пристрою підключено резервне джерело живлення і V_{CC} нижче V_{TP}, читання та запис заборонено. Однак функція відліку часу продовжує працювати без впливу нижчої вхідної напруги;
- GND. Земля;
- V_{BAT}. Вхід резервного живлення для будь-якого стандартного літієвого елемента 3 В або іншого джерела енергії. Для належної роботи напруга батареї повинна бути в робочому діапазоні. Номінальна напруга точки спрацьовування при збої живлення, за якої забороняється доступ до годинника

- та оперативної пам'яті користувача, встановлюється внутрішньою схемою як 1,25 x номінальна напруга VBAT. Літієва батарея ємністю 48 мА/г або більше забезпечить роботу DS1307 понад 10 років без живлення за температури +25°;
- SCL. SCL є вхідним сигналом синхронізації для інтерфейсу I2C і використовується для синхронізації руху даних по послідовному інтерфейсі. Напруга підтягування може досягати 5,5 В незалежно від напруги на VCC.
 - SDA. SDA це пін введення/виведення даних для послідовного інтерфейсу I2C. Вивід SDA має відкритий стік і потребує зовнішнього підтягуючого резистора. Напруга підтягування може досягати 5,5 В незалежно від напруги на VCC;
 - SQW/OUT. Меандр/вихідний драйвер. Коли ввімкнено, біт SQWE встановлено на 1, контакт SQW/OUT виводить одну з чотирьох частот прямокутної форми (1 Гц, 4 кГц, 8 кГц, 32 кГц). Вивід SQW/OUT має відкритий стік і потребує зовнішнього підтягуючого резистора. SQW/OUT працює з VCC або VBAT. Напруга підтягування може досягати 5,5 В незалежно від напруги на VCC. Якщо цей штифт не використовується, його можна залишити плаваючим.

DS1307 використовує зовнішній кристал 32,768 кГц як і його попередник DS1302, який ми описували дещо вище. Для роботи схеми генератора не потрібні зовнішні резистори або конденсатори. В переліку функціональності пінів наведено кілька параметрів для зовнішнього кристала. На рис. 4.7 показана функціональна схема генератора. Якщо використовується кристал із зазначеними характеристиками, час запуску зазвичай менше однієї секунди.

Точність годинника залежить від точності кристала та точності узгодження між ємнісним навантаженням контуру генератора та ємнісним навантаженням, для якого було налаштовано кристал. Додаткову похибку додасть дрейф частоти кристала, спричинений змінами температури. Шум зовнішнього ланцюга, поєднаний із ланцюгом генератора, може призвести до швидкої роботи годинника. На рис. 4.8 показане типове компонування РСВ для ізоляції кристала та генератора від шуму.

DS1307 підтримує протокол I2C. Пристрій, який надсилає дані на шину, визначається як передавач, а пристрій, що приймає дані як приймач. Пристрій, який

керує повідомленням називається головним, а пристрій яким керує головний – називаються підлеглими. Шиною має керувати головний пристрій, який генерує послідовний сигнал (SCL), керує доступом до шини та генерує умови START і STOP. DS1307 працює як підлеглий пристрій на шині I2C.

Передача даних може бути ініційована лише тоді, коли шина не зайнята. Під час передачі даних лінія передачі даних має залишатися стабільною щоразу, коли лінія годинника має високий рівень. Зміни в лінії даних, коли лінія синхронізації є високою, будуть інтерпретуватися як сигнали керування. Передача даних, послідовною шиною I2C, зображена на рис. 4.11.

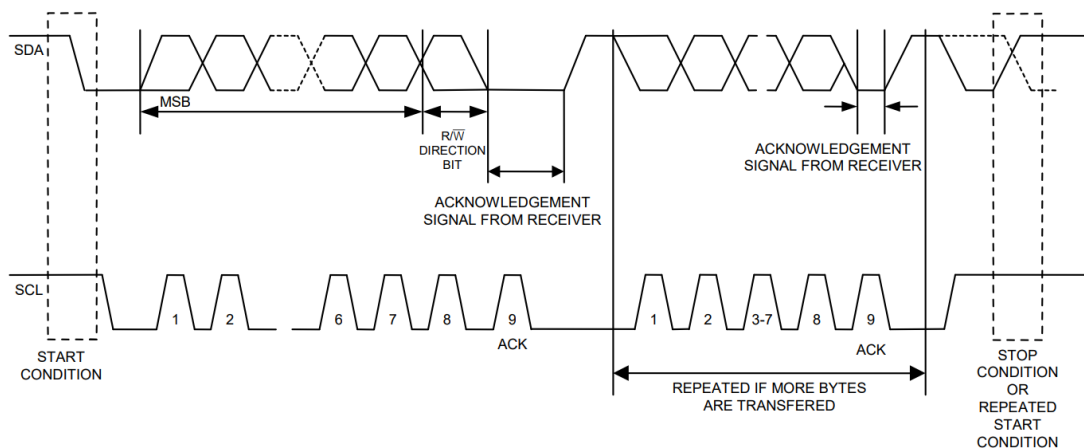


Рисунок 4.11 – Передача повідомлення через шину I2C

Відповідно, були визначені наступні умови шини:

- шина не зайнята, лінії даних і таймера залишаються з високим потенціалом;
- початок передачі даних, зміна стану лінії даних з високого на низький, коли таймер має високий потенціал, визначає умову START;
- зупинка передачі даних, зміна стану лінії даних з низького на високий, у той час як лінія тактового сигналу є високою, визначає стан STOP;
- дійсні дані, стан лінії даних представляє дійсні дані, коли після умови START лінія даних є стабільною протягом періоду високого тактового сигналу. Дані на лінії повинні бути змінені протягом періоду низького тактового сигналу. На кожен біт даних припадає один тактовий імпульс. Кожна передача даних починається з умови START і завершується умовою STOP. Кількість байтів

даних, що передаються між умовами START і STOP, не обмежена й визначається головним пристроєм. Інформація передається по 1 байту і кожен одержувач підтверджує це дев'ятим бітом. У специфікаціях шини I2C визначено стандартний режим (тактова частота 100 кГц) і швидкий режим (тактова частота 400 кГц). DS1307 працює тільки в стандартному режимі;

- підтвердження, кожний пристрій-одержувач, коли йому адресовано, зобов'язаний генерувати підтвердження після отримання кожного байта. Ведучий пристрій повинен генерувати додатковий тактовий імпульс, пов'язаний із цим бітом підтвердження. Пристрій, який підтверджує, повинен опускати лінію SDA під час тактового імпульсу підтвердження таким чином, щоб вона була низькою протягом високого періоду тактового імпульсу, пов'язаного з підтвердженням. Необхідно враховувати час налаштування та час утримання. Ведучий повинен сигналізувати про кінець даних підлеглому, не генеруючи біт підтвердження в останньому байті, який був виведений з підлеглому. У цьому випадку підлеглий пристрій повинен залишити лінію даних високою, щоб дати можливість головному згенерувати умову STOP.

4.2.3 DS3231 .

DS3231 це недорогий, надзвичайно точний годинник реального часу, який підтримує протокол зв'язку I2C, з вбудованим кристалічним генератором та температурною компенсацією [22]. Пристрій має вхід для резервного живлення від батареї та підтримує точний хід годинника у разі зникнення основного живлення пристрою. Інтеграція кристалічного резонатора підвищує довгострокову точність пристрою, а також зменшує кількість деталей на виробничій лінії.

DS3231 доступний для комерційних і промислових діапазонів температур і пропонується в 16-контактному корпусі SO300 mil. Хронограф зберігає інформацію про секунди, хвилини, години, день, дату, місяць і рік. Дата в кінці місяця автоматично коригується для місяців, які містять менше 31 дня, включаючи поправки на високосний рік. Годинник працює в 24-годинному або 12-годинному

форматі з індикатором AM/PM. Передбачено два програмованих будильника часу доби. Адреса та дані передаються послідовно через двонаправлену шину I2C.



Рисунок 4.12 – Зовнішній вигляд DS3231

Точна схема опорної напруги та компаратора з температурною компенсацією контролює стан VCC для виявлення збоїв живлення, забезпечення вихідного сигналу скидання та автоматичного перемикавання на резервне джерело живлення, коли це необхідно.

DS3231 це модуль реального часу, який має керований кварцевий генератор з температурною компенсацією 32 кГц. Температурно-компенсований кристалічний генератор забезпечує стабільний і точний хід еталонного годинника та підтримує його точність в межах ± 2 хвилини на рік при температурному діапазоні -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$. Частотний вихід температурно-компенсованого кристалічного генератору доступний на виводі 32 кГц.

Блок-схема, яка зображена на рис. 4.13 показує основні елементи DS3231. Вісім блоків можна згрупувати в чотири функціональні групи: Температурно-компенсований кристалічний генератор, керування живленням, функція кнопки та годинника реального часу.

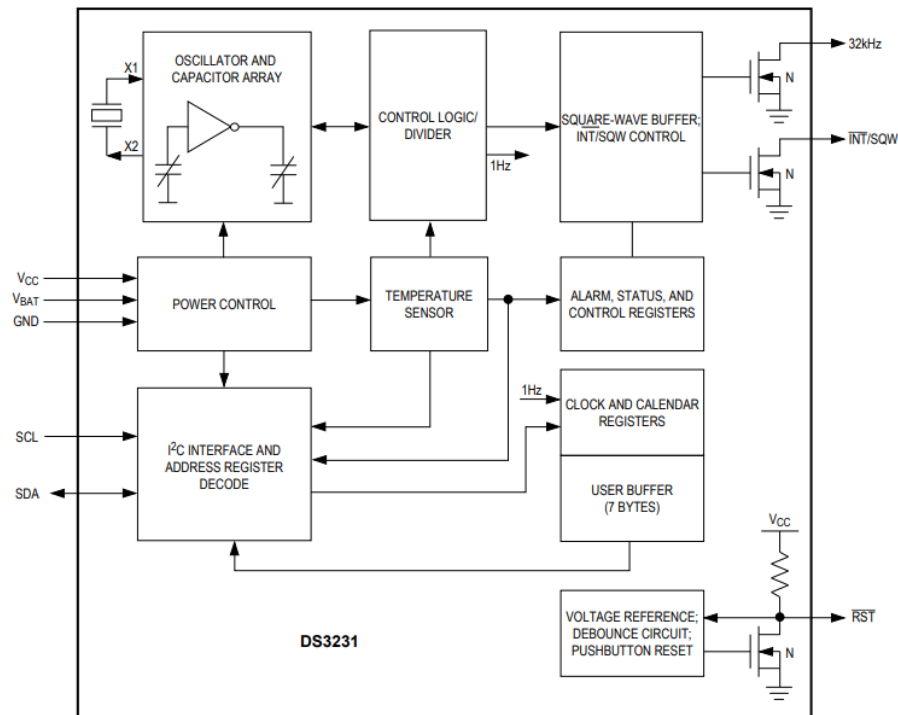


Рисунок 4.13 – Блок схема модуля DS3231

Перерахуємо пини та їх функціональні навантаження:

- 32kHz. Вихід 32 кГц. Для цього контакту з відкритим стоком потрібен зовнішній підтягуючий резистор. Якщо використовується, вихід працює від будь-якого джерела живлення. Його можна залишити «плаваючим», якщо не використовувати;
- V_{CC} . Пін постійного струму для основного джерела живлення. Цей пін слід підпирати за допомогою конденсатора від 0,1 мкФ до 1,0 мкФ. Якщо не використовується, підключається до заземлення;
- INT/SQW. Активне переривання з низьким рівнем або прямокутний вихід. Для цього контакту з відкритим стоком потрібен зовнішній підтягуючий резистор, підключений до джерела живлення 5,5 В або менше. Цей багатофункціональний пін визначається станом біта INTCN у регістрі керування (0Eh). Коли INTCN встановлено на логічний 0, цей пін видає меандр, а його частота визначається бітами RS2 і RS1. Коли INTCN встановлено на логіку 1, тоді збіг між регістрами відліку часу та будь-яким із регістрів тривоги активує контакт INT/SQW (якщо будильник увімкнено).

Оскільки біт INTCN встановлюється на логічну 1, коли вперше подається живлення, на виводі за замовчуванням виводиться переривання з вимкненими сигналами тривоги. Напруга підтягування може досягати 5,5 В, незалежно від напруги на VCC. Якщо цей пін не використовується, його можна не підключити;

- RST. Цей контакт є входом/виходом з відкритим стоком. Він вказує на статус VCC відносно специфікації V_{PF}. Коли VCC падає нижче V_{PF}, на виводі RST знаходиться низький рівень. Коли VCC перевищує V_{PF}, для tRST, пін RST підтягується до високого рівня внутрішнім підтягуючим резистором. Активний низький рівень виходу з відкритим стоком поєднується з функцією кнопкового входу з усуненням дребезгу.
- GND. Земля;
- V_{BAT}. Вхід резервного джерела живлення. У разі використання пристрою з входом V_{BAT} як основного джерела живлення цей пін слід підперти за допомогою конденсатора з низьким витком від 0.1 мкФ до 1.0 мкФ. При використанні пристрою з входом V_{BAT} в якості резервного джерела живлення конденсатор не потрібен. Якщо V_{BAT} не використовується, підключіть його до заземлення.
- SCL. SCL є входним сигналом синхронізації для інтерфейсу I2C і використовується для синхронізації руху даних по послідовному інтерфейсі. Напруга підтягування може досягати 5,5 В незалежно від напруги на VCC;
- SDA. SDA це пін введення/виведення даних для послідовного інтерфейсу I2C. Вивід SDA має відкритий стік і потребує зовнішнього підтягуючого резистора. Напруга підтягування може досягати 5,5 В незалежно від напруги на VCC.

Датчик температури, генератор і логіка керування утворюють кристалічний генератор з температурною компенсацією. Контролер зчитує вихідний сигнал датчика температури на кристалі та використовує таблицю пошуку для визначення необхідної ємності, додає корекцію старіння в регістр AGE, а потім встановлює регістри вибору ємності. Нові значення, включаючи зміни в регістрі AGE, завантажуються лише тоді, коли відбувається зміна значення температури або коли

завершується ініційоване користувачем перетворення температури. Перетворення температури відбувається під час початкового застосування V_{CC} і кожні 64 секунди після цього.

Контроль потужності забезпечується опорною напругою з температурною компенсацією та схемою компаратора, яка контролює рівень V_{CC} . Коли V_{CC} більше, ніж V_{PF} , частина живиться від V_{CC} . Коли V_{CC} менше V_{PF} , але більше V_{BAT} , DS3231 живиться від V_{CC} . Якщо V_{CC} менше V_{PF} і менше V_{BAT} , пристрій живиться від V_{BAT} . Для наочнішого прикладу, наведемо всі можливі варіанти в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Контроль потужності

Стан джерел живлення	Активне джерело живлення
$V_{CC} < V_{PF}, V_{CC} < V_{BAT}$	V_{BAT}
$V_{CC} < V_{PF}, V_{CC} > V_{BAT}$	V_{CC}
$V_{CC} > V_{PF}, V_{CC} < V_{BAT}$	V_{CC}
$V_{CC} > V_{PF}, V_{CC} > V_{BAT}$	V_{CC}

Щоб зберегти заряд батареї, під час першого застосування V_{BAT} пристрою, генератор не запуснеться, доки V_{CC} не перевищить V_{PF} або поки дійсна адреса I2C не буде записана в частину. Типовий час запуску генератора становить менше однієї секунди. Приблизно через 2 секунди після застосування V_{CC} або запису дійсної адреси I2C пристрій вимірює температуру та застосовує розраховану поправку до генератора. Коли генератор працює, він продовжує працювати, доки доступне дійсне джерело живлення (V_{CC} або V_{BAT}) і пристрій продовжує вимірювати температуру та коригувати частоту генератора кожні 64 секунди. Під час першого подання живлення або коли дійсна адреса I2C записується в частину (V_{BAT}), регістри часу та дати скидаються до 01/01/00 01 00:00:00 ((ДД/ММ/РР ДН). ГГ:ХХ:СС)).

Існує кілька режимів роботи, які впливають на величину споживаного струму V_{BAT} . Коли пристрій живиться від V_{BAT} і послідовний інтерфейс активний, споживається активний струм батареї, I_{BATA} . Коли послідовний інтерфейс неактивний, використовується струм I_{BATT} , який включає усереднений струм

перетворення температури. Струм перетворення температури I_{BATTC} , вказується, оскільки система повинна мати можливість підтримувати періодично більші імпульси струму та підтримувати дійсний рівень напруги. Струм збереження даних I_{BATDR} , це струм, який споживає частина, коли генератор зупинено ($\text{EOSC} = 1$). Цей режим можна використовувати для мінімізації вимог до батареї, коли немає необхідності підтримувати інформацію про час і дату, наприклад, коли кінцева система очікує на відправку клієнту.

Функція скидання кнопки DS3231 передбачає підключення кнопкового перемикача до вихідного контакту RST. Коли DS3231 не перебуває в циклі скидання, він постійно відстежує сигнал RST на наявність низького переднього фронту. Якщо виявлено зміну фронту, DS3231 усуває тріскіт перемикача, підтягнувши RST на низький рівень. Після закінчення внутрішнього таймера (PB_{DB}) DS3231 продовжує контролювати лінію RST. Якщо лінія все ще низька, DS3231 постійно відстежує лінію, шукаючи наростаючий фронт. Після виявлення, DS3231 примусово встановлює на виводі RST низький рівень і утримує його для t_{RST} . RST також використовується для позначення стану збою живлення. Коли V_{CC} нижчий за V_{RF} , генерується внутрішній сигнал про збій живлення, який змушує контакт RST перейти в низький рівень. Коли V_{CC} повертається до рівня вище V_{RF} , контакт RST утримується на низькому рівні протягом приблизно 250 мс (t_{REC}), щоб забезпечити стабілізацію джерела живлення. Якщо генератор не працює, коли застосовано V_{CC} , t_{REC} обходиться, а RST негайно стає високим. Затвердження вихідного сигналу RST, будь то кнопкою або виявленням збою живлення, не впливає на внутрішню роботу DS3231.

Зважаючи на вище перелічену інформацію, можемо дійти висновку, що саме модуль DS3231 повністю задовольняє наші вимоги. Перечислимо його переваги та корисні функції:

- високоточний годинник реального часу повністю керує всіма функціями відліку часу;
- годинник реального часу рахує секунди, хвилини, години, дату місяця, місяць, день тижня та рік із компенсацією високосного року, що діє до 2100;

- точність ± 2 ppm від 0°C до $+40^{\circ}\text{C}$;
- точність $\pm 3,5$ ppm від -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$;
- вихід цифрового датчика температури: $\pm 3^{\circ}\text{C}$ точність;
- реєстрація для корекції старіння;
- простий послідовний інтерфейс для підключення до більшості мікроконтролерів ;
- швидкий (400 кГц) інтерфейс I2C;
- вхід резервного живлення від батареї для безперервного відліку часу;
- діапазон робочих температур: комерційний (0°C до $+70^{\circ}\text{C}$) і промисловий (від -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$).

4.3 Датчик струму ACS712.

ACS712, типова схема якого зображена на рис. 4.14, забезпечує економічне та точне рішення для вимірювання змінного або постійного струму в промислових, комерційних і комунікаційних системах [23]. Типові сфери застосування включають: керування потужним двигуном, виявлення навантаження та керування ним та захист систем від перевантаження по струму. Пристрій складається з точної лінійної схеми Холла з низьким зміщенням, з мідним провідним контуром, розташованим біля поверхні матриці. Прикладений струм, що протікає через цей мідний шлях провідності, створює магнітне поле, яке датчик Холла перетворює на пропорційну напругу.

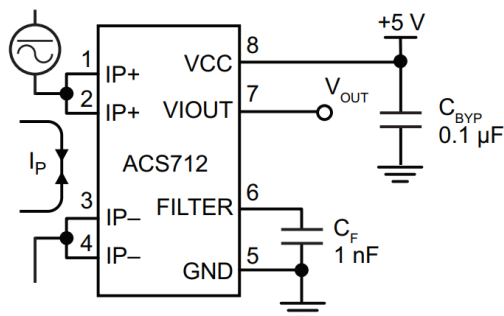


Рисунок 4.14 – Типове зображення ACS712

Точність пристрою оптимізована завдяки тісній близькості магнітного сигналу до датчика Холла. Точна, пропорційна напруга забезпечується мікросхемою Холла з низьким зміщенням, стабілізованою за допомогою силової частини ШІМ. Вихідний сигнал пристрою має додатний нахил ($>V_{IOUT}(Q)$), коли зростаючий струм протікає через первинний мідний провідний шлях (рис. 4.14, від контактів 1 і 2 до контактів 3 і 4), який використовується для вибірки струму. Внутрішній опір цього провідного шляху становить 1,2 мОм, що забезпечує низькі втрати потужності. Товщина мідного провідника забезпечує витривалість пристрою при перевищенні струму до 5 раз. Клеми провідної лінії електрично ізолювані від сигнальних проводів (контакти з 5 по 8). Це дозволяє використовувати ACS712 у сетапах, що потребують електричної ізоляції, без використання оптоізоляторів чи інших дорогих методів ізоляції.

Чутливість датчика струму ACS712, це зміна вихідного сигналу пристрою у відповідь на зміну 1 А через первинний провідник. Чутливість є добутком чутливості магнітного кола (G/A) і коефіцієнта підсилення лінійного підсилювача (mV/G). Підсилення лінійного підсилювача програмується на заводі для оптимізації чутливості (mV/A) для повного струму пристрою.

Шум (VNOISE). Добуток підсилення лінійного підсилювача (mV/G) і рівня шуму для лінійного з ефектом Холла (близько 1 Г). Рівень шуму визначається на основі теплового та дробового шуму, що спостерігається в елементах Холла. Ділення шуму (mV) на чутливість (mV/A) забезпечує найменший струм, який пристрій здатний визначити.

Лінійність (ELIN). Ступінь, до якого вихідна напруга змінюється прямо пропорційно первинному струму через його повну амплітуду. Нелінійність на виході може бути пов'язана з насиченням концентратора потоку, що наближається до повного струму. Для визначення лінійності використовується рівняння 4.1.

$$100 \left\{ 1 - \left[\frac{\Delta gain \cdot \%sat(V_{IOUT_{half-scale\ amp.}} - V_{IOUT(Q)})}{2 \cdot (V_{IOUT_{half-scale\ amp.}} - V_{IOUT(Q)})} \right] \right\}, \quad (4.1)$$

де $V_{IOUT_half-scale\ ampere}$ = вихідній напрузі (В), коли вибірковий струм наближається до повної шкали $\pm I_p$.

Симетрія (ESYM). Ступінь, до якого абсолютна вихідна напруга з мікросхеми змінюється пропорційно позитивному чи негативному повному первинному струму. Для отримання симетрії використовується формула 4.2.

$$100 \left(\frac{V_{IOUT\ full-scale\ amp.} - V_{IOUT(Q)}}{V_{IOUT(Q)} - V_{IOUT\ full-scale\ amp.}} \right). \quad (4.2)$$

Напруга електричного зміщення (VOE) це відхилення вихідного сигналу пристрою від ідеального значення $V_{CC}/2$ у стані спокою через немагнітні причини. Щоб перетворити цю напругу в струм, розділіть на чутливість пристрою, точність датчика (E_{TOT}). Точність являє собою максимальне відхилення фактичного виходу від його ідеального значення, це також відомо як загальна помилка виведення. Точність проілюстрована графічно на рис. 4.15, залежність вихідної напруги від струму.

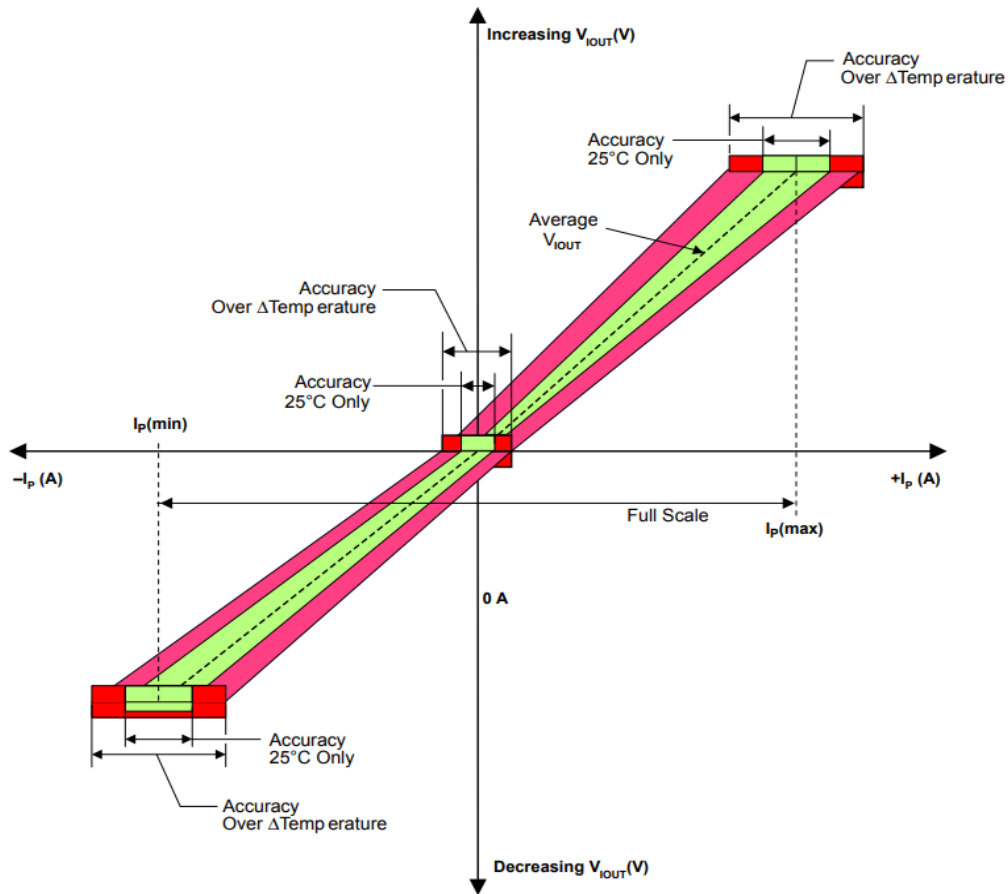


Рисунок 4.15 – Вихідна напруга проти струму вибірки. Точність при 0 А і повному струмі

Точність поділяється на чотири області:

- 0 А при 25°C. Точність при нульовому струмі при 25°C, без впливу температури;
- 0 А вище температури Δ . Точність при нульовому струмі, включаючи вплив температури;
- максимальний струм при 25°C. Точність при повному струмі при 25°C, без впливу температури;
- максимальний струм понад Δ температури. Точність при повній шкалі струму, включаючи вплив температури.

Час увімкнення (t_{PO}). Коли джерело живлення нарощується до робочої напруги, пристрою потрібен кінцевий час для живлення внутрішніх компонентів, перш ніж реагувати на вхідне магнітне поле. Час увімкнення живлення, визначається як час, необхідний для встановлення вихідної напруги в межах $\pm 10\%$

від свого сталого значення під дією магнітного поля після того, як джерело живлення досягне своєї мінімальної заданої робочої напруги, як показано на рис. 4.16.

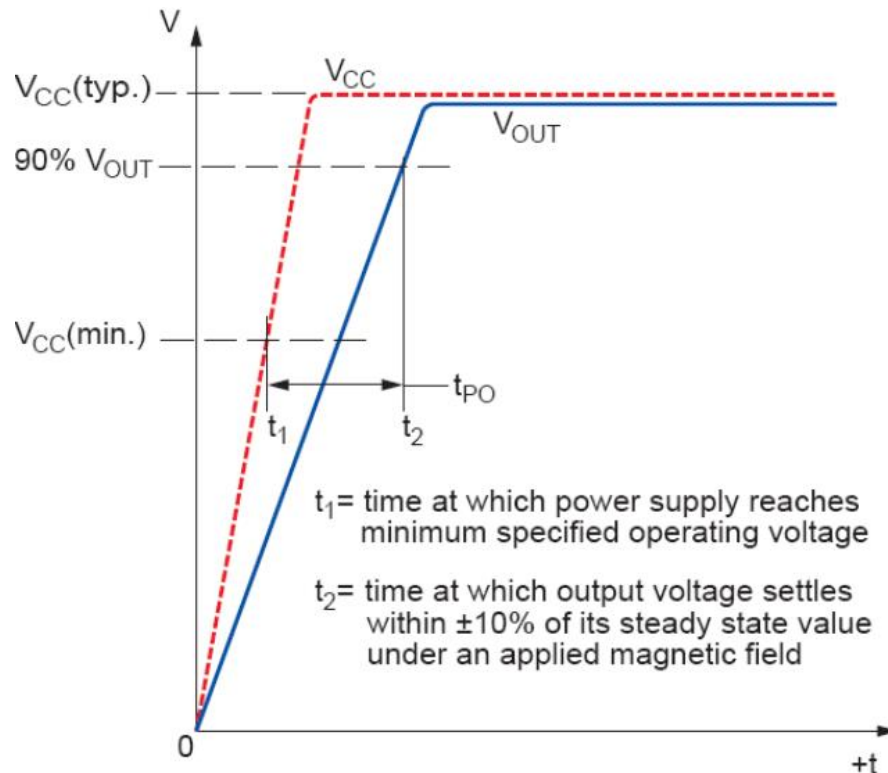


Рисунок 4.16 – Діаграма увімкнення ACS712 в робочий стан

Стабілізація силової частини регулятора ШІМ – інноваційний метод схеми, який використовується для мінімізації напруги зсуву елемента Холла та пов'язаного з ним підсилювача на кристалі. Allegro має технологію Chopper Stabilization, яка майже усуває дрейф вихідного сигналу Холла викликаний температурою. Цей метод зменшення зсуву заснований на процесі модуляції-демодуляції сигналу.

Модуляція використовується для відділення небажаного сигналу зміщення постійного струму від магнітно-індукованого сигналу в частотній області. Потім, використовуючи фільтр низьких частот, модульоване зміщення постійного струму пригнічується, поки магнітоіндукований сигнал проходить через фільтр. У результаті цього підходу до стабілізації, вихідна напруга з мікросхеми Холла стає нечутливою до температурних і механічних впливів. Наочно це можна побачити на рис. 4.17, де зображені результати випробування датчику.

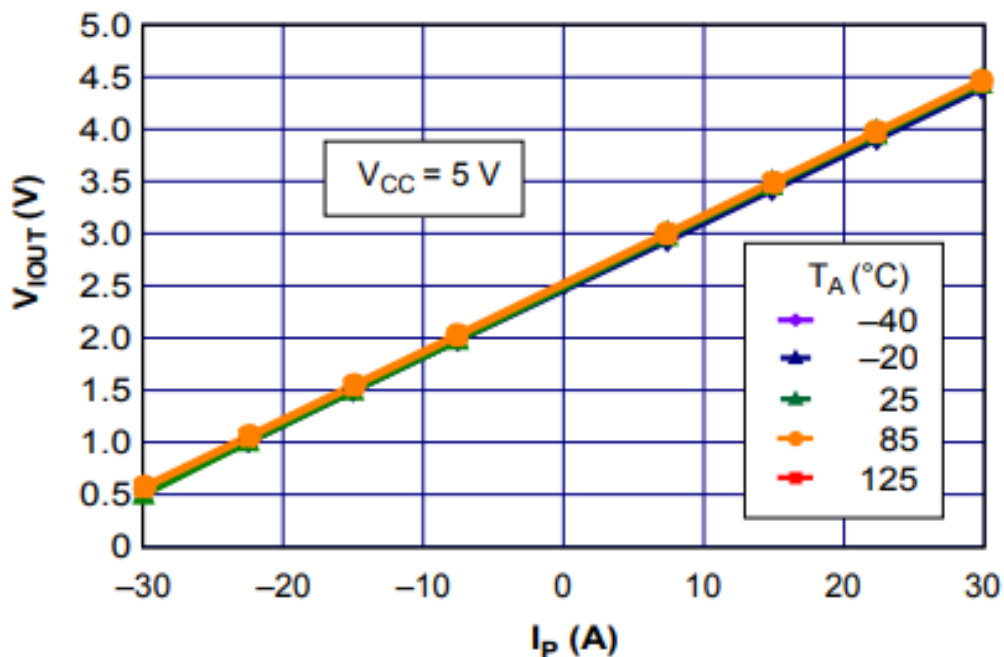


Рисунок 4.17 – Залежність напруги виходу від струму входу при різних T

Ця технологія створює пристрої, які мають надзвичайно стабільну напругу електричного зсуву, стійкі до термічного стресу та мають точну здатність відновлюватися після зміни температури. На рис. 4.18 зображена структурна схема концепції техніки стабілізації чоппера. Ця техніка стала можливою завдяки використанню процесу BiCMOS, який дозволяє використовувати підсилювачі з низьким зміщенням і низьким рівнем шуму в поєднанні з високою щільністю логічної інтеграції та схемами вибірки та утримання.

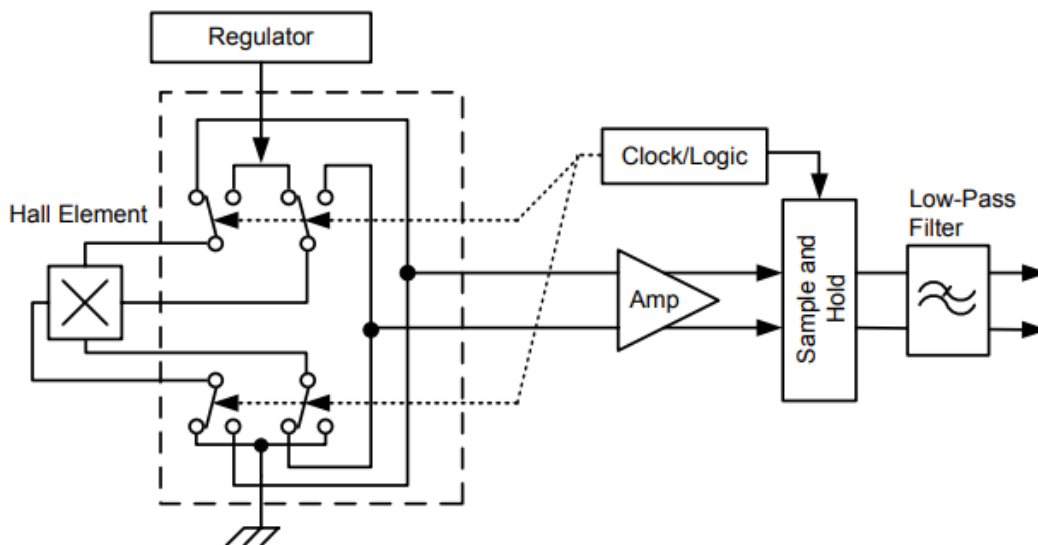


Рисунок 4.18 – Концепція техніки стабілізації чоппера

При застосуваннях низькочастотного датчика, вигідно додати простий RC-фільтр до виходу пристрою. Такий фільтр низьких частот покращує відношення сигнал/шум, отже і роздільну здатність вихідного сигналу пристрою. Однак додавання RC-фільтра до виходу мікросхеми датчика може призвести до небажаного ослаблення виходу пристрою. Ослаблення сигналу ΔV_{ATT} , є результатом ефекту резистивного дільника між опором зовнішнього фільтра R_F , вхідним імпедансом та опором схеми інтерфейсу користувач, R_{INTFC} . Коли фільтр низьких частот побудований поза стандартним пристроєм на ефекті Холла, що і показано на рис. 4.19, резистивний дільник може існувати між резистором фільтра R_F , і опором схеми інтерфейсу користувача R_{INTFC} . Цей резистивний дільник спричинить надмірне затухання, як визначено функцією передачі для ΔV_{ATT} . Передатна функція цього резистивного дільника визначається за формулою 4.3.

$$\Delta V_{ATT} = V_{IOUT} \left(\frac{R_{INTFC}}{R_F + R_{INTFC}} \right). \quad (4.3)$$

Навіть якщо R_F і R_{INTFC} сконструйовані так, щоб мати максимально наближені значення, два окремих значення опору, швидше за все будуть відрізнятися від температури на різні величини. Тому ослаблення сигналу змінюватиметься залежно від температури.

Зауважимо, що в багатьох випадках вхідний опір R_{INTFC} типового аналого-цифрового перетворювача може становити лише 10 кОм. ACS712 містить внутрішній резистор, з'єднання контакту FILTER з друкованою платою та внутрішній буферний підсилювач. За допомогою цієї схемної архітектури користувачі можуть реалізувати простий RC-фільтр шляхом додавання конденсатора C_F , від контакту FILTER до землі, як відображено на рис. 4.19. Використання контакту FILTER, усуває ефекти ослаблення резистивного дільника між R_F і R_{INTFC} , як показано на рис. 4.18.

Буферний підсилювач всередині ACS712 усуває загасання, спричинене ефектом резистивного дільника, описаним у рівнянні для ΔV_{ATT} . Таким чином, пристрій ACS712 ідеально підходить для використання у високоточних програмах,

які не можуть дозволити собі ослаблення сигналу, пов'язане з використанням зовнішнього RC фільтра низьких частот.

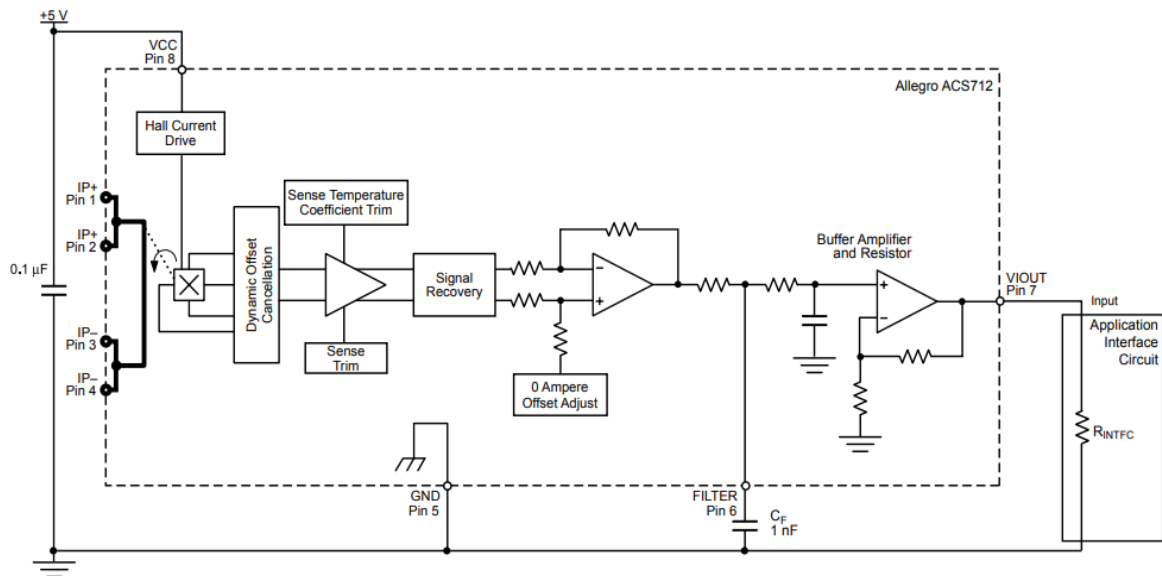


Рисунок 4.19 – Застосування RC-фільтра, для зменшення шуму

На сам кінець, перерахуємо основні характеристики та переваги датчику струму ACS712, який працює на ефекті Холла:

- низький рівень шуму аналогового сигналу;
- час наростання вихідного сигналу 5 мкс у відповідь на ступінчастий вхідний струм;
- смуга пропускання 80 кГц
- загальна вихідна похибка 1,5% при $T_A = 25^\circ\text{C}$
- невеликий, низькопрофільний корпус SOIC-8
- 1,2 МОм внутрішній опір провідника;
- 2,1 kV_{RMS} мінімальна напруга ізоляції від контактів 1-4 до контактів 5-8;
- 5,0 В, робота від одного джерела живлення;
- вихідна чутливість від 66 мВ/А;
- вихідна напруга пропорційна змінному або постійному струму;
- надзвичайно стабільна вихідна напруга зсуву;
- майже нульовий магнітний гістерезис.

4.4 Датчик напруги ZMPT101B

Модуль ZMPT101B – це компактний однофазний модуль датчика напруги змінного струму на основі мініатюрного прецизійного трансформатора напруги 2 мА/2 мА ZMPT101B виробництва Qingxian Zeming Langxi Electronic. Зовнішній вигляд всього модуля зображений на рис. 4.20, принципова схема на рис. 4.21, а його основні характеристики наведені в табл. 4.5.

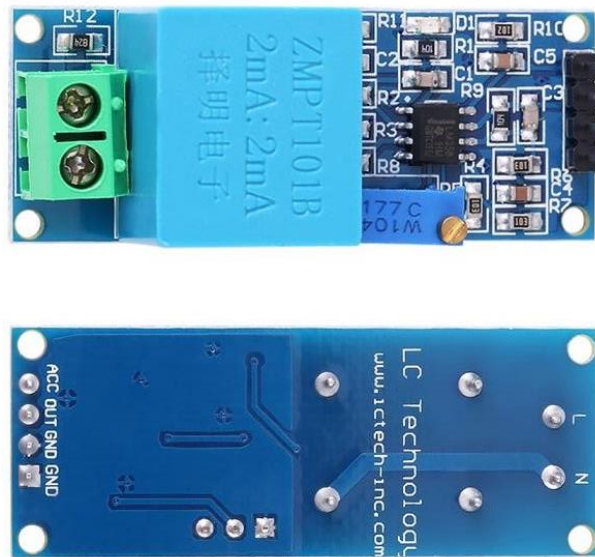


Рисунок 4.20 – Зовнішній вигляд модуля ZMPT101B

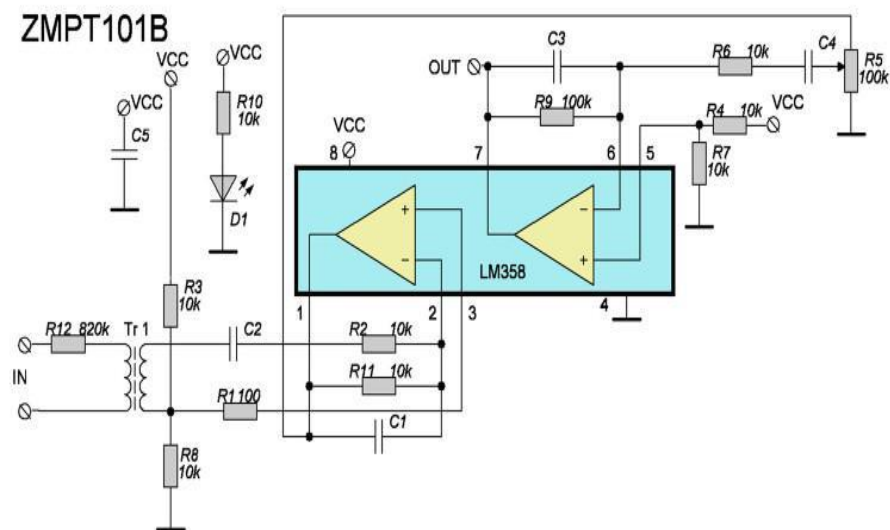


Рисунок 4.21 – Принципова схема модуля ZMPT101B

Таблиця 4.5 – Основні характеристики ZMPT101B

Характеристика	Значення
Номінальний вхідний струм	2 мА
Номінальний вихідний струм	2 мА
Коефіцієнт витків	1000:1000
Похибка фазового кута	$\leq 20^\circ$
Робочий діапазон	0~1000В; 0~10мА
Лінійність	$\leq 0.2\%$
Допустима помилка	$-0.3\% \leq f \leq +0.2\%$
Напруга ізоляції	4000В
Інкапсуляція	Епоксидна
Робоча температура	$-40^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$

Вихідний сигнал, становив близько 1,1 В коли на вході була напруга 225 В змінного струму (50 Гц). Зауважимо, що аналоговий вихід має зсув ($V_{cc}/2$). Тобто, якщо до входу нічого не підключено, а напруга живлення модуля становить 5 В постійного струму, на виході модуля в режимі очікування буде близько 2,5 В постійного струму.

В принципі, аналоговий вихідний сигнал модуля коливається вгору та вниз у попередньо визначених межах. Зверніть увагу на те, щоб на виході модуля була повна синусоїда. Якщо форма хвилі обрізана, ви повинні уточнити вихід, щоб запобігти можливим помилкам вимірювання (звичайно, кожен модуль має свої власні відхилення, тому вбудований тримпот регулювання амплітуди буде корисним включенням). Вам потрібно стежити за формою вихідного сигналу перед першим використанням.

Аналоговий вхідний контакт мікроконтролера за замовчуванням відобразить аналогову вхідну напругу від 0 В до 5 В у цілі значення від 0 до 1023 з роздільною здатністю 4,9 мВ на одиницю. Повертаючись до модуля ZMPT101B, він може працювати з напругою змінного струму до 250 В (50 Гц/60 Гц). Його

вторинна схема, зосереджена на мікросхемі подвійного операційного підсилювача LM358, також дозволяє налаштувати ізольований аналоговий вихід за допомогою вбудованого багатооборотного резистора. Рекомендована робоча напруга модуля становить 5 В постійного струму.

Аналогове вимірювання модуля напруги змінного струму подібне до модуля струму. Значення напруги коливатиметься вгору та вниз у діапазоні від 0 до 5 В (значення від 0 до 1023). Якщо напруга не виявлена, він надсилатиме аналоговий сигнал із половиною напруги живлення (приклад, 2,5 В), що становить приблизно значення 512. Різні модулі матимуть різну помилку відхилення. Деякі можуть зчитувати саме 512, коли вимірювальна напруга не виявлена, але деякі можуть бути трохи більше або трохи менше, ніж значення 512. Наладчикам доведеться вручну ввести значення зміщення під час першого запуску або під час відсутності напруги.

4.5 Аналогово-цифровий перетворювач ADS1015

ADS1015 це дуже маленький, малопотужний, безшумний, 12-розрядний аналого-цифровий перетворювач. ADS1015 складається з ядра аналого-цифрового перетворювача з внутрішньою опорною напругою, тактового генератора та інтерфейсу I2C. В ADS1015 також інтегрований підсилювач з програмованим коефіцієнтом підсилення і програмований цифровий компаратор. На рис. 4.22 показана функціональна блок-схеми ADS1015.

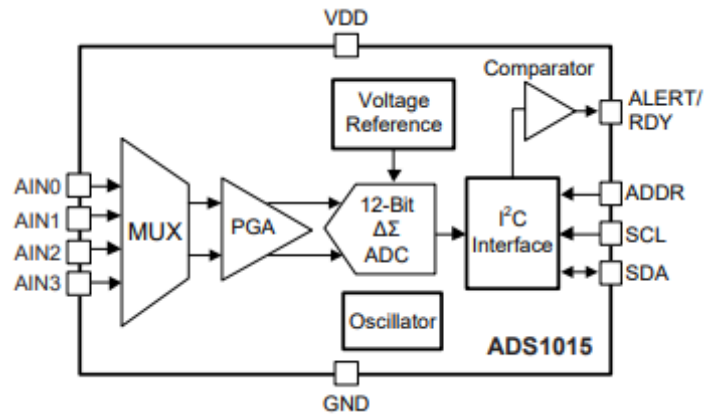


Рисунок 4.22 – Функціональна блок-схема ADS1015

Ядро аналогово-цифрового перетворювача ADS1015 вимірює диференціальний сигнал V_{IN} , який є різницею $V(AINP)$ і $V(AINN)$. Ядро перетворювача складається з диференціального $\Delta\Sigma$ -модулятора, за яким слідує цифровий фільтр. Ця архітектура призводить до дуже сильного ослаблення будь-яких синфазних сигналів. Вхідні сигнали порівнюються з внутрішньою опорною напругою. Цифровий фільтр отримує високошвидкісний бітовий потік від модулятора і видає код, пропорційний вхідній напрузі. ADS1015 має два доступних режими перетворення: одиночний і неперервний.

У одиночному режимі аналогово-цифровий перетворювач виконує одне перетворення вхідного сигналу за запитом, зберігає значення перетворення у внутрішньому регістрі перетворення, а потім переходить у очікування. Цей режим призначений для забезпечення економії електроенергії в системах, які потребують лише періодичних перетворень або яким властиві тривалі періоди простою.

У режимі безперервного перетворення аналогово-цифровий перетворювач автоматично починає перетворення вхідного сигналу, як тільки завершується попереднє перетворення. Швидкість безперервного перетворення дорівнює запрограмованій швидкості передачі даних. Дані можна зчитувати в будь-який час і завжди відображати останні завершені перетворення.

ADS1015 містить вхідний мультиплексор (MUX), див. рис. 4.23. Таким чином, можна виміряти чотири односторонніх, або два диференціальних сигнали.

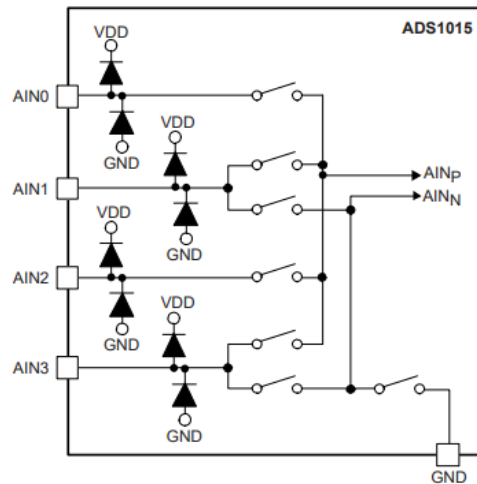


Рисунок 4.23 – Структурна схема внутрішнього мультиплексора

Діоди від електростатичного розряду (ESD), підключені до VDD і GND, захищають аналогові входи ADS1015. Потрібно підтримувати абсолютну напругу будь-якого входу в межах діапазону, зазначеного у рівнянні 4.4, щоб запобігти включенню діодів ESD.

$$GND - 0.3V < V_{AINX} < VDD + 0.3V \quad (4.4)$$

Якщо напруга на вхідних контактах потенційно може порушити ці умови, використовуйте зовнішні діоди Шотткі та послідовні резистори, щоб обмежити вхідний струм до безпечних значень.

ADS1015 використовує вхідний каскад з перемиканням конденсаторів, де конденсатори постійно заряджаються, а потім розряджаються для вимірювання напруги між AINp і AINN. Частота, на якій дискретизується вхідний сигнал, називається частотою дискретизації або частотою модулятора (fMOD). ADS1015 має внутрішній генератор 1 МГц, який далі ділиться на коефіцієнт 4 для генерації fMOD на 250 кГц. Конденсатори у цьому вхідному каскаді невеликі, і для зовнішньої схеми середнє навантаження здається резистивним. На рис. 4.24 показана ця структура. Значення конденсатора встановлює опір і швидкість перемикання.

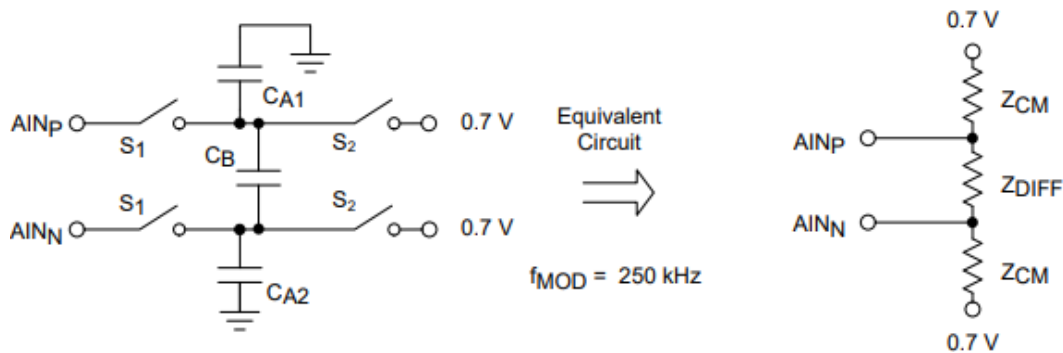


Рисунок 4.24 – Спрощена аналогова вхідна схема

На рис. 4.25 показано синхронізацію для перемикачів на рис. 4.24. Під час фази вибірки перемикачі S1 закриті. Ця подія стягує CA1 до $V(AINP)$, CA2 до $V(AINN)$ і CB до $(V(AINP) - V(AINN))$. Під час фази розряду S1 спочатку відкривається, а потім S2 закривається. І CA1 і CA2 потім розряджаються приблизно до 0,7 В, а CB розряджається до 0 В. Ця зарядка споживає дуже малий перехідний струм від джерела, що керує аналоговими входами ADS1015. Середнє значення цього струму можна використовувати для розрахунку ефективного опору (Z_{eff}), де $Z_{eff} = V_{IN} / I_{AVERAGE}$.

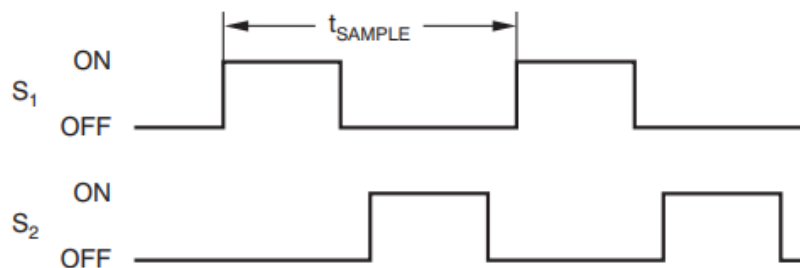


Рисунок 4.25 – Часова діаграма для пристрою, який керує входами

Програмований підсилювач посилення (PGA) реалізований перед аналогово-цифровим перетворювачем ADS1015. Повномасштабний діапазон налаштовується бітами $PGA[2:0]$ у регістрі Config і може бути встановлений на $\pm 6,144$ В, $\pm 4,096$ В, $\pm 2,048$ В, $\pm 1,024$ В, $\pm 0,512$ В, $\pm 0,256$ В. Таблиця 4.6 показує FSR разом із відповідним розміром LSB. Рівняння 13 показує, як обчислити розмір LSB з вибраного повного діапазону.

$$LSB = \frac{FSR}{2^{12}}. \quad (4.5)$$

Таблиця 4.6 – Повномасштабний діапазон і відповідний розмір LSB

FSR	LSB
± 6,144В	3 мВ
± 4,096В	2 мВ
± 2,048В	1 мВ
± 1,024В	0,5 мВ
± 0,512В	0,25 мВ
± 0,256В	0,125 мВ

Зважаючи на вище перелічену інформацію, можемо дійти висновку, що саме ADS1015 повністю задовольняє наші вимоги. Перечислимо його переваги та корисні функції:

- широкий діапазон живлення: від 2,0 В до 5,5 В;
- 12-бітна роздільна здатність без шумів;
- низьке споживання струму – 150 мкА (режим безперервного перетворення);
- програмована швидкість передачі даних, від 128 SPS до 3,3 kSPS;
- внутрішня опорна напруга з низьким дрейфом;
- інтерфейс I2C, чотири контактні адреси;
- внутрішній генератор на 1 МГц;
- швидкий (400 кГц) інтерфейс I2C;
- чотири односторонніх або два диференціальних входи;
- програмований компаратор;
- діапазон робочих температур від -40°C до $+125^{\circ}\text{C}$.

5 РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ОКРЕМИХ ЛАНЦЮГІВ СИСТЕМИ

5.1 Реалізація безперебійного джерела живлення

За технічним завданням, нам необхідно забезпечити безперебійну роботу схеми, навіть при відсутності світла. Ціль дуже проста, внутрішній годинник реального часу повинен продовжувати свій хід, щоб при відновленні електропостачання, відлік був синхронізований з часом. Умова виконується, коли у відповідному слоті обраного нами модуля реального часу DS3231 стоїть батарея формату CR2032. Але так як лічильник, за законом України, повинен бути опломбований та доступ до батареї обмежений звичайному користувачеві, мною було вирішено додати ще один рівень автономності.

Цей рівень, повинен забезпечувати живленням не лише модуль реального часу, а й сам мікроконтролер ESP07-S. Таким чином, ми зможемо програмно вимкнути безпроводний зв'язок, у разі зникнення електропостачання – для більшої економії об'єму батареї та записати в бортовий журнал деталі про аварійну ситуацію. Схема безперебійного живлення, наведена на рис. 5.1.

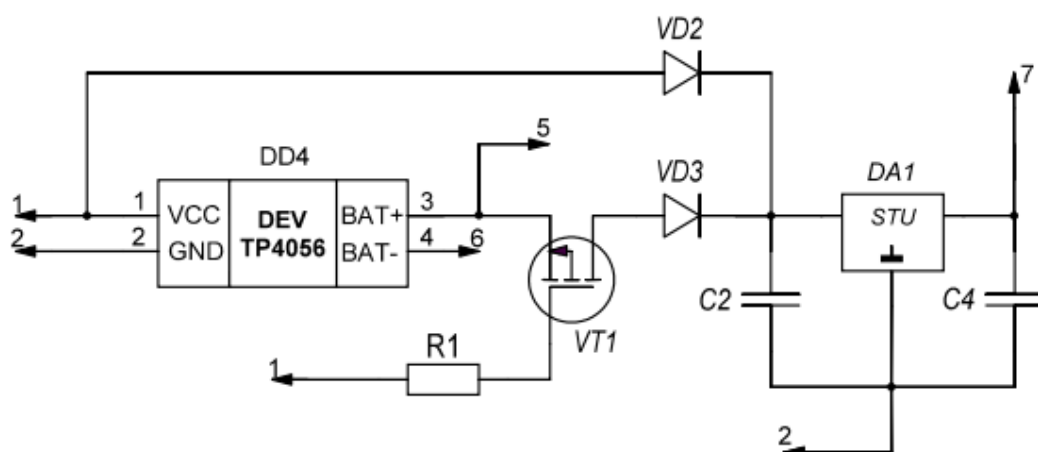


Рисунок 5.1 – Принципова схема безперебійного джерела живлення

В основі схеми є спеціалізований модуль захисту на основі мікросхеми TP4056. Це повний лінійний зарядний пристрій постійного струму/постійної напруги для однокомпонентних літій-іонних акумуляторів з функцією наскрізного заряду. Тобто, при нормальних умовах функціонування, коли живлення в нормі, батарея заряджається та ніяк не приймає участі в живленні схеми, її відділяє від цього закритий польовий транзистор VT1. При зникненні основного джерела живлення, напруга затвору опуститься до 0 та відкриє доступ до струму батареї. Діоди VD2 та VD3 грають роль запобіжників короткого замикання.

Тепловий зворотний зв'язок регулює струм заряду батареї, щоб обмежити тепловиділення під час роботи з високою потужністю. Напруга заряду фіксується на рівні 4,2 В – що є оптимальним для батарей типу Li-ion, а струм заряду можна програмувати ззовні за допомогою одного резистора. TP4056 автоматично припиняє цикл заряду, коли струм заряду падає до 1/10 запрограмованого значення після досягнення кінцевої напруги плаваючого заряду. Інші функції TP4056 включають моніторинг струму, блокування під напругою, автоматичне перезарядження та два контакти стану, які вказують на припинення заряду та наявність вхідної напруги.

Наприкінці схеми стоїть лінійний стабілізатор NCP1117ST33T3, який налаштований на напругу 3.3В. Він перетворює напругу з первинного блока живлення (при нормальних умовах) або з Li-Ion батареї (при відсутності електропостачання) для живлення центрального мікроконтролера. Його потужності з великим запасом вистачить на живлення мікроконтролера. Решта внутрішніх елементів живиться від 5В, тому для живлення всієї схеми був обраний звичайний блок живлення на 5В та 1А.

5.2 Реалізація виводу інформації

За технічним завданням, актуальна інформація про стан лічильника повинна відправлятися на локальний сервер для можливості перегляду користувачем та дублюватися на пристрій виводу інформації. Для цих цілей був обраний звичайний LCD2004 дисплей який має 4 рядки по 20 елементів. Кожен елемент складається з 35 точок. Такий дисплей ще називають символьний, так як він має у своїй будові

знакогенератор, який може відображати знаки, літери латинці та кирилиці. Також, є вільна пам'ять, в яку користувач може записати до десяти власних символів у двійковому виді. Дуже зручно при формуванні головного екрану будь-якого пристрою. Креслення такого дисплею зображено на рис. 5.2.

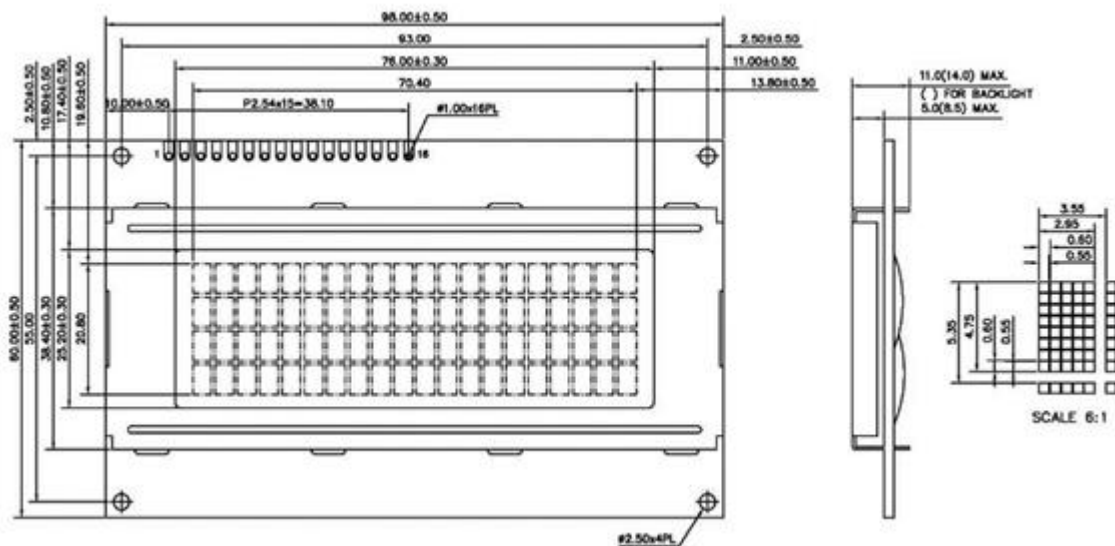


Рисунок 5.2 – Креслення LCD2004

Для зручного та швидкого спілкування між мікроконтролером та дисплеєм слід використати мікросхему адаптер PCF8574T. За її допомогою можна під'єднати дисплей до мікроконтролеру за допомогою протоколу I2C використавши всього два контакти. Схема підключення дисплею зображена на рис. 5.3. Потенціометр R6 потрібен для однократного ручного налаштування чіткості зображення.

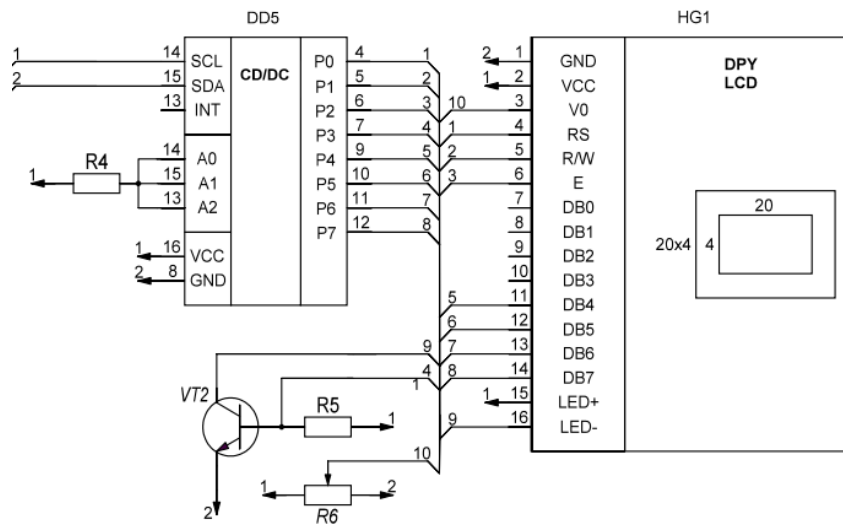


Рисунок 5.3 – Схема підключення дисплею

5.3 Код для датчика струму ACS712 на ефекті Холла

Мікроконтролер ESP07-S можна запрограмувати за допомогою скриптів Lua, мовою програмування «C» та мовою програмування Wiring. Ми будемо розробляти код в середовищі Arduino IDE мовою Wiring. На це є декілька причин:

- велика кількість готових бібліотек. Допомогає зменшити час на розробку та відладку;
- спрощена розробка проекту;
- просте налаштування «preloader»;
- велика база навчальних матеріалів.

В мові програмування Wiring є два основних цикли, це Setup та Loop. Ще можна виділити технічний рівень, де проводиться підключення бібліотек. В циклі Setup, ми поміщаємо глобальні змінні, проводимо ініціалізацію функцій, прив'язуємо призначення пінів, тощо. Цей цикл, виконується лише один раз при надходженні живлення на мікроконтролер.

Цикл Loop – зациклений, він буде виконуватись постійно. Всередині нього ми й будемо розробляти основний код. В цьому циклі loop ми можемо створювати безліч вкладених циклів, запуск або зупинку таймерів перезапис даних, тощо.

Розберемо код для збору інформації по силі струму, який протікає в контурі. Розіб'ємо його на логічні частинки і пояснимо по порядку, перша ділянка коду зображена на рис. 5.4.

```
static bool acs712_flag;  
static int count = 0; //Оголошуємо змінну лічильника вимірювань  
static int adc_avr = 0; // Оголошуємо змінну для розрахунку середніх показань  
static uint16_t vals[600 + 1]; // Оголошуємо масив для зберігання результатів вимірів  
static float Ieff; // Оголошуємо змінну струму  
static float ACS712_mod = 50.0; //Чутливість
```

Рисунок 5.4 – Частина коду, для роботи ACS712

Спершу, об'явимо локальні змінні всередині функції. Напис «Static» означає, що при повторному визові функції, в них збережуться данні від попередньої ітерації. Після напису «Static», об'являється тип змінної та безпосередньо сама змінна з початковим значення. Якщо початкове значення змінної не вказане, то змінна автоматично буде прирівняна до нуля.

Тепер, на рис. 5.5, наведемо код програми, який безпосередньо отримує дані з аналогово-цифрового перетворювача та перетворює його в зрозумілі людині дані.

```

1 if (acs712_tmr.status() == 1) {
2     acs712_flag = 1;
3     uint16_t last_adc_read;
4     count++;
5     if (count >= 300) {
6         float U, Ueff;
7         float Sum_U_Square = 0.0;
8         count = 0;
9         adc_avr = adc_avr / 300;
10        for (int i = 0; i < 600 + 1; i++) {
11            if (vals[i] != 0) {
12                if (abs(i - adc_avr) > 2) {
13                    U = ((float)(i - adc_avr)) / 1024 ;
14                    Sum_U_Square += U * U * vals[i];
15                }
16                vals[i] = 0;
17            }
18        }
19        Ueff = sqrt(Sum_U_Square / 300);
20        Ieff = Ueff / ACS712_mod;
21        adc_avr = 0;
22    }
23    last_adc_read = analogRead(A0);
24    vals[last_adc_read]++;
25    adc_avr += last_adc_read;

```

Рисунок 5.5 – Частина коду, для роботи ACS712

Спочатку, йде перевірка внутрішнього таймеру по якому спрацьовує дана функція (1 рядок). Якщо таймер працює – код виконується далі. Створюємо локальну змінну для фіксування зчитаного з аналогового входу значення всередині умови «IF» (3 рядок), для того щоб вона прирівнювалася до нуля, коли функція буде викликана повторно.

Всередині структури «IF», створюємо лічильник проведених ефективних вимірів на 300 ітерацій за допомогою ще однієї структури «IF» (4,5 рядки). Оголошуємо змінні для розрахунку відхилення напруги на виході датчика та ефективної напруги та змінну для розрахунку суми квадратичних напруг (6,7 рядки). Зчитуємо значення з аналогового входу (23 рядок). Збільшуємо значення елемента масиву з індексом ліченого показання на одиницю (24 рядок). Збільшуємо змінну

розрахунку середнього значення на лічені показання (25 рядок). Після чого, розраховуємо середнє зі знятих з аналогового піна показань (9 рядок).

Після цього, створюємо цикл «FOR», для розрахунку середньоквадратичного значення (10 рядок). Цикл вимірів буде продовжуватись, поки об'явлений масив даних не буде повністю заповнений даними (11 рядок). Тепер ще один рівень перевірки, якщо значення «i» відрізняється від середньорозрахованого більш ніж на 2 одиниці, перетворюємо відхилення знятого значення від середнього в мілівольти (щодо вольтажу ACS712 = 5V, рядок 13). Оновлюємо суму квадратичних значень напруги, `vals[i]` містить кількість результатів вимірів з `i` значенням (14 рядок). В кінці розрахунку обнуляємо значення масиву, ніж порахувати його повторно (16 рядок).

Тепер, коли ми маємо достатній набір даних, обчислюємо ефективну напругу на виході з датчика та обчислюємо ефективний струм (19, 20 рядок).

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розроблено інформаційно-вимірювальний комплекс для обліку витрати електроенергії у багатоквартирному будинку. Він слідкує за поточним спожитим струмом, за допомогою датчика Холла, та поточною напругою. Лічильник рахує спожиту електроенергію в кВт на годину та вчасно, автоматично передає показники в обслуговуючу компанію.

Інформаційно-вимірювальний комплекс забезпечує виконання наступних функцій:

- вимірювання змінного струму;
- вимірювання змінної напруги;
- трансформація показників, для кращого розуміння користувачем;
- точне відображення часу;
- безпроводний зв'язок з мережею інтернет;
- синхронізація часу з мережею, у випадку неточного ходу годинника;
- автоматична передача показників у відповідний час, на сервер надавача послуг електропостачання;
- мінімальне налаштування користувачем;
- автономність протягом 40 діб;
- простий інтерфейс;
- перегляд денної спожитої електроенергії;
- перегляд нічної спожитої електроенергії;
- перегляд добової спожитої електроенергії;
- перегляд місячного споживання електроенергії;
- перегляд спожитої електроенергії протягом 3-х місяців.

Пристрій відповідає технічним завданням.

У науковій частині, було розглянуто фізику процесу ефекта Холла та дослідження в цій області. Наведений принцип роботи датчика струму на ефекті Холла, який був застосований у проектуванні системи.

Було сформульоване і поставлене завдання, що до проектованої системи, на основі огляду теперішнього та минулого рівня техніки. В процесі проектування був розроблений алгоритм роботи інформаційно-вимірювального комплексу для обліку витрати електроенергії у багатоквартирному будинку. За отриманим алгоритмом склали структурну схему комплексу.

В спеціально відведеному розділі, був проведений вибір елементної бази з повним їх описом та порівнянням. На основі чого була створена функціональна схема, а трохи пізніше – принципова схема.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Кодекс комерційного обліку електричної енергії від 01.12.2021 № 2351, пункт 1.1.4. Режим доступу: zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0311874-18.
2. Кодекс комерційного обліку електричної енергії від 01.12.2021 № 2351, пункт 2.6.1. Режим доступу: zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0311874-18.
3. Кодекс комерційного обліку електричної енергії від 01.12.2021 № 2351, пункт 8.6.2. Режим доступу: zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0311874-18.
4. Кодекс комерційного обліку електричної енергії від 01.12.2021 № 2351, пункт 5. Режим доступу: zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0311874-18.
5. Hall, E. H. (1879). *Am. J. Math.* 2, 287.
6. Karplus, R., and Luttinger, J. M. (1954). *Phys. Rev.* 95, 1154.
7. Smit, J. (1958). *Physica* 24, 39.
8. Berger, L. (1970). *Phys. Rev. B* 2, 4559.
9. Crepieux, A., and Bruno, P. (2001). *Phys. Rev. B* 64, 14416.
10. Gaj, J. A. (2011). *Semimagnetic Semiconductors. Comprehensive Semiconductor Science and Technology.*
11. D'yakonov, M. I., and Perel, V. I. (1971). *ZhETF Pis. Red.* 13, 657.
12. Hirsh, J. E. (1999). *Phys. Rev. Lett.* 83, 1834. GMR, TMR and BMR 91
13. Murakami, S., Nagaosa, N., and Zhang, S. C. (2003). *Science* 301, 1348.
14. Sinova, J., Culcer, D., Niu, Q., Sinitsyn, N. A., Jungwirth, T., and MacDonald, A. H. (2004). *Phys. Rev. Lett.* 92, 126603.
15. Kane, C. L., and Mele, E. J. (2005). *Phys. Rev. Lett.* 95, 146802.
16. Kane, C. L., and Mele, E. J. (2006). *Phys. Rev. Lett.* 95, 226801.
17. Valenzuela, S. O., and Tinkham, M. (2006). *Nature* 442, 176.
18. Kimura, T., Ohtani, Y., Sato, T., Takahashi, S., and Maekawa, S. (2007). *Phys. Rev. Lett.* 98, 156601.
19. Kontani, H., Naito, M., Hirashima, D. S., Yamada, K., and Inoue, J. J. *Phys. Soc. Jpn.* (2007). *J. Phys. Soc. Jpn.* 76, 103702, see also Kontani, H., Tanaka, T., Hirashima, D. S., Yamada, K., and Inoue, J. (2008). *Phys. Rev. Lett.* 100, 096601, and *Phys. Rev. Lett.* 102, 016601 (2009).
20. <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS1302.pdf>
21. <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS1307.pdf>
22. <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS3231.pdf>
23. <https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/0712.pdf>