

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Розробка цифрової плати керування приладу АЗУР в гірничо-інженерному застосуванні
(тема)

Виконав:

здобувач 2 року навчання
групи ЕПШМ-23-1

Чупахін А. Б.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 171 Електроніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

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

Керівник доц. каф. МЕЕПШ Глухов О. В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

_____ (прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
(повна назва)

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 171 Електроніка
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Електронні прилади та пристрої
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Чупахіну Артему Борисовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка цифрової плати керування приладу АЗУР
в гірничо-інженерному застосуванні.

затверджена наказом університету від 6 грудня _____ 2024 р. № 1283Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 20__ р.

3. Вихідні дані до роботи мікросхема LM7805, мікросхема SP485, мікроконтролер
PIC18F14K22-I/SS, 7 оптронів PC817, оптрон TLP627, 2 оптрона H11L1, 2 моста DB107,
мікросхема MC33063A, 4 керамічних конденсатора, 6 елетролітичних конденсаторів,
32струмообмежуючих резистора, супресор P6KE6A, дросель, роз'єм PSH2H-2-16,
склотекстоліт. _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1) Вивчити принцип роботи апарату захисту АЗУР.4ПП, проаналізувати основні вузли
схеми апарату та знайти оптимальні точки зняття сигналів для цифрової плати
керування. _____

2) Побудувати схему цифрової плати керування апаратом АЗУР.4ПП та спроектувати
друковану плату. _____

3) Інтегрувати розроблену плату керування у внутрішню конструкцію апарата та провести тестування, щоб переконатися в правильності роботи розробленої плати.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри): слайд-презентація, схема електрична принципова.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	11.09.2024	
2	Аналітичний огляд джерел	18.09.2024	
3	Проектування та розрахунки пристрою	25.09.2024	
4	Написання програми	20.10.2024	
5	Збірка пристрою	21.11.2024	
6	Оформлення пояснювальної записки	26.11.2024	
7	Підготовка презентації	29.11.2024	
8	Рецензування та нормоконтроль		
9	Захист роботи		

Дата видачі завдання _____ 20__ р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис) _____ (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи містить: 59 сторінок, 15 рисунків, 16 посилань, 3 додатки.

ШАХТНО-ГІРНИЧА ПРОМИСЛОВІСТЬ, АПАРАТ ЗАХИСТУ АЗУР.4ПП, ПРИСТРІЙ ВИБОРУ ПОШКОДЖЕНОЇ ФАЗИ, МІКРОКОНТРОЛЕР PIC18F14K22-I/SS, RS-485, USART, MODBUS RTU, ІСКРОБЕЗПЕЧНІ КОЛА, СЕГМЕНТНА АПРОКСИМАЦІЯ.

Об'єкт дослідження: цифрова плата керування приладу АЗУР в гірничо-інженерному застосуванні.

Мета роботи: розрахувати та спроектувати цифрову плату керування для інтегрування у внутрішню будову апарату захисту АЗУРПП.

Актуальність: сьогодні важливим є можливість передачі даних про стан мережі та самого пристрою до централізованих систем моніторингу, що дозволить покращити контроль за електричними мережами в шахтах, оперативно виявляти аварійні ситуації та підвищити загальний рівень безпеки. Це рішення допоможе усунути недоліки нинішньої конструкції АЗУР.4ПП, зберігаючи його надійність, але додаючи функції сучасної інформатизації.

Область застосування: шахтно-гірничя промисловість.

ABSTRACT

Explanatory note to the qualification work contains: 59 pages, 15 figures, 16 references, 3 appendices.

MINING INDUSTRY, AZUR.4PP PROTECTION DEVICE, DEVICE FOR SELECTING THE DAMAGED PHASE, PIC18F14K22-I/SS MICROCONTROLLER, RS-485, USART, MODBUS RTU, INTRINSICALLY SAFE CIRCUITS, SEGMENTAL APPROXIMATION.

Object of research: digital control board of the AZUR device in mining engineering applications.

Purpose of work: to calculate and design a digital control board for integration into the internal structure of the AZUR.4PP protection device.

Relevance: today it is important to be able to transmit data on the state of the network and the device itself to centralized monitoring systems, which will allow to improve control over electrical networks in mines, promptly detect emergency situations and increase the overall level of safety. This solution will help eliminate the shortcomings of the current design of AZUR.4PP, while maintaining its reliability, but adding modern informatization functions.

Field of application: mining industry.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП	8
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	10
1.1 Постановка проблеми	10
1.2 Призначення та характеристики апарату захисту АЗУР.4ПП.....	17
1.3 Будова та принцип дії апарату АЗУР.4ПП	20
1.4 Інтерфейс RS-485 та протокол Modbus RTU	21
1.5 Іскробезпечні кола.....	27
2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ ПЛАТИ КЕРУВАННЯ ДЛЯ ПРИЛАДУ АЗУР.4ПП.....	32
2.1 Спектр вимірюваних параметрів цифрової плати	32
2.2 Визначення оптимальних точок зняття параметрів у схемі апарату	33
2.3 Аналіз і обґрунтування вибору мікроконтролера	42
2.4 Алгоритми програмної обробки отриманих даних	44
2.5 Розробка принципової електричної схеми плати: вибір компонентів та аналіз вузлів.....	48
3 ТЕСТУВАННЯ РОБОЧОГО ПРОТОТИПУ В УМОВАХ ПРИБЛИЖЕНИХ ДО РОБОЧИХ	51
3.1 Робочий прототип.....	51
3.2 Вимірювальне обладнання та випробування	52
ВИСНОВКИ.....	56
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	58
ДОДАТОК А	Ошибка! Закладка не определена.
ДОДАТОК Б	Ошибка! Закладка не определена.
ДОДАТОК В.....	Ошибка! Закладка не определена.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АВ – автоматичний вимикач

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

БРВ – блокування реле витоку

ЕРС – електрорушійна сила

ПВПФ – пристрій вибору пошкодженої фази

РВ – реле витоку

USART – Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter

Modbus RTU – відкритий протокол передачі даних

RS-485 – стандарт для передачі даних у промислових умовах

PIC – сімейство мікроконтролерів компанії Microchip Technology Inc

CRC16 – алгоритм знаходження контрольної суми для перевірки цілісності даних

ВСТУП

В Україні шахтно-гірничя промисловість відіграє важливу роль в енергетичній незалежності та промислового розвитку країни. Особливо важливим є вугільний сектор, який забезпечує значну частину енергетичних потреб країни, а також є основою для функціонування металургійної галузі.

Проте українська шахтно-гірничя промисловість стикається з численними викликами, зокрема старінням виробничих потужностей, високою аварійністю та необхідністю впровадження сучасних технологій. Однією з головних проблем є безпека праці в умовах старих шахт, багато з яких працюють на межі своїх технічних можливостей. Це спричиняє зростання ризиків аварій, вибухів метану та витоків струму, що вимагає термінової модернізації інфраструктури та впровадження нових технологій. Одним з ефективних способів підвищення безпеки є використання сучасних технологій і приладів для контролю та моніторингу умов у шахтах. Спеціальні системи безпеки дозволяють вчасно виявляти витoki струму, зміни концентрації газів або зсуви гірських мас. Вони попереджають шахтарів про небезпеку та дають можливість швидко вжити заходів, запобігаючи аваріям і зберігаючи життя працівників.

Однією з важливих причин інформатизації шахт є необхідність забезпечення безперервного моніторингу та передачі інформації про стан різноманітних відповідальних механізмів. Це включає високовольтні ячейки (комплектні розподільчі пристрої високої напруги), трансформаторні підстанції, пускачі та системи плавного пуску конвеєрів. Такі системи вимагають автоматизованого збору даних для оперативного реагування та гарантування безпеки. Інформатизація дозволяє значно підвищити ефективність і безпеку роботи шахт, надаючи операторам і технічному персоналу всю необхідну інформацію в реальному часі. Один із ключових елементів інформатизації в шахтно-гірничій промисловості — це

система моніторингу електричних мереж, де важливу роль відіграє апарат захисту АЗУР. Зокрема, даний апарат у трансформаторних підстанціях відповідає за моніторинг стану вихідної мережі. Ця система не лише контролює ізоляцію, але й повідомляє про стан мережі, дозволяючи виявляти та оперативно реагувати на виникнення струмів витоку або інших аварійних ситуацій. У серії АЗУР.МК подібні функції успішно реалізовані вже понад 10 років, що робить її ефективним і перевіреним рішенням для багатьох шахт.

Однак, не всі мережі однаково підходять для стандартних рішень. У багатьох шахтах використовуються напівпровідникові перетворювачі частоти, які часто обладнані низькоякісними вихідними фільтрами або взагалі не мають їх. Це створює додаткові ризики для роботи мережі та ускладнює моніторинг стану ізоляції. Для таких специфічних умов було розроблено апарат АЗУР.4ПП, призначений для роботи з напівпровідниковими мережами. Завдяки спеціалізованій архітектурі, АЗУР.4ПП забезпечує надійний захист і контроль у мережах з подібними характеристиками, де стандартні рішення можуть не давати очікуваних результатів. Але конструкція цих пристроїв не передбачає елементів інформатизації. Це означає, що апарат не здатен передавати дані про свій стан або стан мережі до централізованих систем моніторингу, що обмежує його інтеграцію в сучасні автоматизовані системи управління шахтами.

Отже метою даної дипломної роботи є розробка плати інформатизації, яка буде інтегрована в апарат АЗУР.4ПП та стане посередником між апаратом та сучасною системою управління шахтами. Створення такої плати забезпечить можливість передачі даних про стан мережі та самого пристрою до централізованих систем моніторингу, що дозволить покращити контроль за електричними мережами в шахтах, оперативно виявляти аварійні ситуації та підвищити загальний рівень безпеки. Це рішення допоможе усунути недоліки нинішньої конструкції АЗУР.4ПП, зберігаючи його надійність, але додаючи функції сучасної інформатизації.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Постановка проблеми

В умовах роботи з електричними мережами в шахтно-гірничій промисловості особливо важливо забезпечувати надійний захист від струмів витоку, оскільки мережі часто мають складну архітектуру, яка включає значні ємнісні струми, викликані довгими кабелями та високими навантаженнями. Це створює додаткові складнощі в розробці пристроїв вибору та шунтування пошкодженої фази (ПВПФ), оскільки параметри спрацьовування пристрою повинні враховувати не тільки струм витоку, але й багато інших факторів, таких як ємнісні струми та дія електрорушійних сил (ЕРС) вибігу електродвигунів.

Процес пошкодження ізоляції електрообладнання та можливість дотику людини до елементів електричної мережі, що знаходяться під напругою, носять випадковий характер, і тому основною вимогою, що пред'являються до апаратури захисного відключення, є постійна готовність її до виконання захисних функцій. Це може бути забезпечене, якщо апаратура здійснює безперервний контроль опору ізоляції мережі, що захищається, а решта елементів, що проводять відключення мережі від джерела живлення і знижують короткочасний струм витоку, будуть в стані постійної готовності виконати свої функції під час вступу команди. Таким чином, апаратура в цілому повинна бути безперервно діючою.

Одним із найважливіших параметрів апаратури, що здійснює захист людей від ураження електричним струмом, є час її спрацьовування при виникненні небезпечної ситуації. Очевидно, що менше цей час, то вище рівень безпеки експлуатації електричної мережі. Однак рішення проблеми швидкодії ускладнюється необхідністю забезпечення сталої роботи апаратури захисту при перехідних процесах, викликаних комутацією електроприймачів та виникненням

витоків струму. Недостатня стійкість роботи апаратури захисного відключення, помилкові спрацьовування її при опорах ізоляції мережі, що значно перевищують уставку, можуть призвести до серйозних труднощів експлуатації.

В якості вихідних даних для вибору принципу дії ПВПФ приймаються вимоги ДСТУ EN 61140:2019 про неперевищення короточасного струму (100мА) і кількості електрики (50мА·с), що протікають через опір витoku. Враховуючи, що покладений в основу принцип визначення ушкодженої фази не передбачає компенсацію ємнісних струмів, відповідно змінюються умови впливу струму на людину, тому необхідно визначити необхідні параметри роботи ПВПФ з аналізу процесу відключення витoku в мережі з наступним стохастичним відключенням контакторів (рис 1.1).

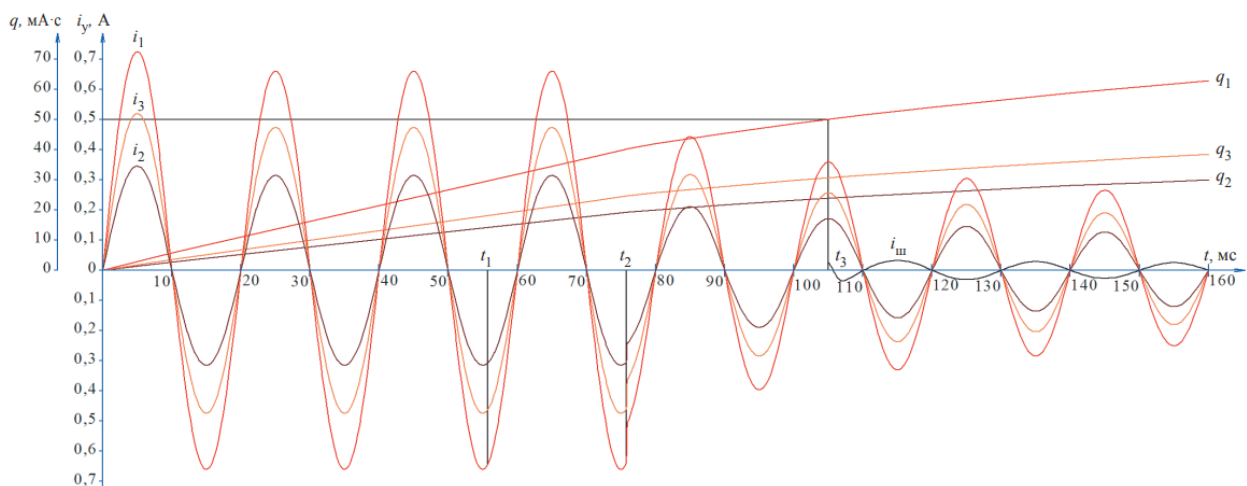


Рисунок 1.1 – Діаграма перебігу струму після відключення витoku опором 1 кОм у розподільчій мережі та кількості електрики q через опір витoku i_y

Струм через витік i_1 при $U = 1140$ і $C_c = 1$ мкФ на фазу, i_2 - при $U = 660$ В та $C_c = 1$ мкФ на фазу, i_3 - при $U = 660$ В і $C_c = 2$ мкФ на фазу, C_c - загальна ємність мережі, t_1 та t_2 - момент видачі сигналу на відключення АВ і відключення АВ, t_3 - момент шунтування пошкодженої фази на землю.

Процес відключення витоку в мережі складається з кількох стадій:

- а) виявлення витоку – це первинне завдання, яке повинно бути виконане якомога швидше для мінімізації ризику ураження електричним струмом;
- б) вибір пошкодженої фази – етап, на якому визначається фаза, в якій стався витік, що дозволяє точніше відключити пошкоджену ділянку;
- в) дія ЕРС вибігу електродвигунів – у деяких випадках ЕРС, що генерується обертовими машинами, може підтримувати протікання струму навіть після відключення, що потребує особливої уваги при проектуванні ПВПФ;
- г) шунтування пошкодженої фази на землю малим опором – на цьому етапі здійснюється додатковий захист для мінімізації залишкового ризику.

Основними параметрами, які мають бути враховані під час проектування ПВПФ, є короткочасний струм витоку – це струм, який протікає на початковій стадії виникнення витоку. Його значення є важливим для визначення порогу спрацьовування ПВПФ. Безпечність пристрою для людини визначається як сума всіх складових процесу відключення, включаючи ємнісні та індуктивні струми, дію ЕРС вибігу та інші фактори.

Струм від моменту виникнення до відключення мережі змінюється згідно із законом:

$$i_{y1} = I_0 + I_{1m} \sin \omega t + I_{2m} e^{-\alpha t} + I_{3m} e^{-\beta t} \sin(\omega_0 + \alpha), \quad (1.1)$$

де I_0 - постійний вимірювальний струм апарату;

I_{1m} - амплітуда встановленого струму витоку;

I_{2m} та I_{3m} - амплітуди аперіодичної та вільної складових;

α і β — декременти згасання складових періодичної та вільної;

ω – частота мережі;

ω_0 - частота вільної складової;

t – поточний час.

Після відключення мережі її напруга зменшується за експоненціальним законом, а струм — через витік відповідно:

$$I_{y2} = I_0 + K_1 I_{1m} e^{-\left(\frac{t}{T_{ед}}\right)} \sin \omega t, \quad (1.2)$$

де K_1 -коефіцієнт зниження напруги після відключення мережі;

$T_{ед}$ — постійна часу вибігу електродвигуна, що визначається параметрами мережі.

Складова струму, що впливає на людину, виникає після відключення контакторів і дії ЕРС вибігу електродвигуна на одиничному відгалуженні мережі. Отже, сума всіх складових процесу відключення через витік визначається у вигляді середньоквадратичного значення суми виразів (1.1) і (1.2):

$$q = \sqrt{I_0^2 + t_1 \int_0^{t_1} I_{y1}^2 dt + K_1(t_2 - t_1) \int_{t_1}^{t_2} i_{y2}^2 dt} = \sqrt{I_0^2 + q_1^2(t_1) + q_2^2(t_2 - t_1)}, \quad (1.3)$$

Виходячи з умови гарантування безпеки при максимально можливій кількості електрики, його значення визначається при нарузі $1,1U_{ном}$ та ємності мережі 1 мкФ на фазу. Сумарний час відключення витоку спільно з автоматичним вимикачем, отриманий експериментальним шляхом, приймається 80 мс, тоді $q_1(t_1) = 41 \text{ мА} \cdot \text{с}$, при цьому q_2 має перевищувати $9 \text{ мА} \cdot \text{с}$.

На рис.1.2 представлена функціональна схема розробленої системи захисту від струмів витоку для шахтних мереж напругою 1200 В. Система захисту складається з комплексу функціональних блоків, що забезпечують підключення до контрольованої мережі, контроль опору ізоляції, автоматичне налаштування режиму компенсації ємнісної складової струму витоку, визначення та захисне

шунтування пошкодженої фази, а також захисне відключення у разі зниження опору ізоляції до небезпечного рівня.

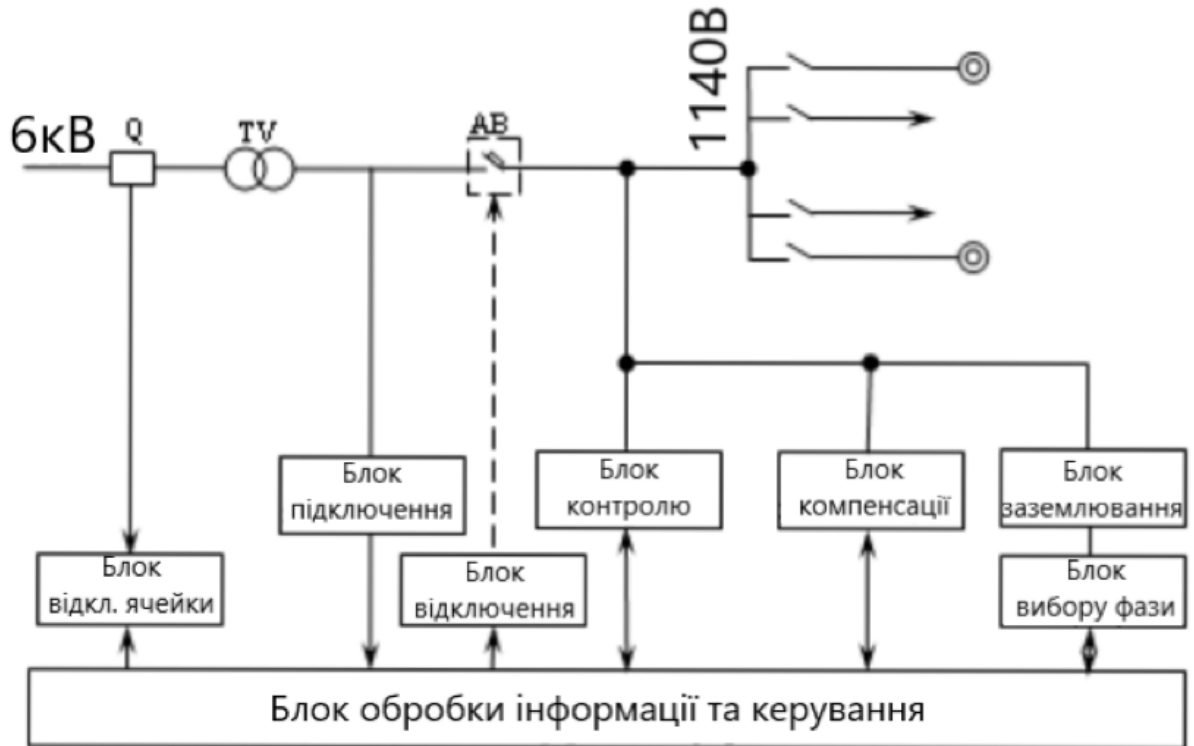


Рисунок 1.2 – Функціональна схема системи контролю ізоляції та захисту від струмів витоку для мережі з напругою 1140В

Для зниження небезпеки короточасного режиму в апаратурі захисту від струмів витоку при напрузі 1200 В застосований короткозамикач. У цьому разі зниження короточасних струмів витоку (струмів через людину) забезпечується блоком автоматичної компенсації ємнісних струмів витоку, а так само замиканням на землю (шунтуванням) фази електричної мережі з пошкодженою ізоляцією при попередньому її визначенні (блок вибору аварійної фази) .

У систему захисту від струмів витоку також входять штатні пристрої БРВ, що встановлюються у пускачах та станціях управління. Ці пристрої виробляють попередній контроль ізоляції окремих відгалужень мережі та не дозволяють

включати відгалуження зі знизеним опором. Така споруда системи захисту дозволяє не тільки підвищити рівень безпеки експлуатації електрообладнання, але й значною мірою знизити від'ємний ефект не селективності дії загальномережевого захисту. Неселективно працює така система захисту лише при відключенні мережі у разі виникнення небезпечного витоку струму. Повторна подача напруги можлива лише на справні ділянки мережі. Це дозволяє експлуатувати все електрообладнання за винятком пошкодженого і істотно полегшує пошук несправностей.

На сьогодні для виконання цих завдань існує широкий спектр пристроїв для захисту від струмів витоку, основною функцією яких, як вже було зазначено, є моніторинг опору ізоляції мережі під час її експлуатації та автоматичне відключення електроживлення у разі виявлення витоків струму. Одним з найбільш відомих прикладів таких пристроїв є апарати захисту серії АЗУР, які широко використовуються в шахтах для контролю електричних мереж та гарантування безпеки.

Проте сучасні вимоги до безпеки та ефективності експлуатації мереж у вугільній і гірничорудній галузях ставлять нові виклики перед цими системами. Стандартні пристрої захисту від струмів витоку забезпечують лише базовий рівень безпеки, але не надають повної картини стану електричної системи. Це ускладнює процес моніторингу та управління, особливо в умовах великих промислових комплексів, де відсутність оперативної інформації про стан систем може призвести до аварій та збоїв.

У зв'язку з цим виникає необхідність інформатизації систем захисту електромереж. Інформатизація полягає у впровадженні технологій збору, обробки та передачі даних про стан електричних мереж в реальному часі. Це дозволить операторам і технічному персоналу отримувати актуальну інформацію про стан ізоляції та наявність струмів витоку, що значно підвищить оперативність реагування на аварійні ситуації та забезпечить більш надійну роботу обладнання.

Інтеграція таких систем в загальну мережу управління шахтами дозволить досягти вищого рівня безпеки та ефективності.

Для кардинального покращення моніторингу та управління шахтною мережею пропонується розробити спеціальну цифрову плату, яка буде безпосередньо інтегрована в апарати АЗУР.4ПП. Ця плата перетворить традиційні пристрої захисту на розумні датчики, здатні збирати детальну інформацію про стан мережі та передавати її в централізовану систему управління.

Таким чином, ми отримаємо єдину інтегровану систему, де кожен апарат АЗУР.4ПП стане активним учасником процесу моніторингу. Це дозволить:

- а) збільшити точність вимірювань: Безпосередня інтеграція забезпечить більш точне зчитування даних, оскільки відпадає необхідність у додаткових з'єднаннях і проміжних перетвореннях сигналів;
- б) зменшити кількість помилок: Автоматизація процесу збору та передачі даних мінімізує ризик людського фактора.;
- в) подовжити термін служби обладнання: Проактивне виявлення та усунення несправностей дозволить запобігти виходу з ладу дорогого обладнання.

Інтегрована цифрова плата перетворить шахтну мережу з напівпровідниковими перетворювачами частоти на інтелектуальну систему, яка самостійно контролює свій стан та оптимізує роботу.

1.2 Призначення та характеристики апарату захисту АЗУР.4ПП



Рисунок 1.3 – Загальний вигляд апарату АЗУР.4ПП

Апарат захисту від струмів витоку АЗУР.4ПП (рис 1.3) призначений для захисту людей від ураження електричним струмом та інших небезпечних наслідків витоків струму на землю в електричних мережах трифазного змінного струму частотою 50 Гц напругою 660 і 1140 В з ізолюваною нейтраллю трансформатора і в системах електробезпеки мереж з винесеним частотно-регульованим приводом подачі вугільних комбайнів. Апарат захисту вбудовується розподільні пристрої нижчої напруги пересувних трансформаторних підстанцій, що застосовуються в підземних виробках та на поверхні вугільних та гірничорудних підприємств.

Апарат захисту призначений для роботи в наступних умовах:

- а) температура навколишнього повітря мінус 10 до плюс 65°C;
- б) відносна вологість навколишнього повітря до 100% (з конденсацією) вологи) за температури 35°C;
- в) довкілля вибухонебезпечне по газу (метану) та вугільного пилу, запиленість до 1200 мг/м³;

- г) відсутність різких поштовхів (ударів та сильної тряски);
- д) робоче становище у просторі не регламентується;
- е) апарат забезпечує нормальну роботу за зміни напруги мережі від 85 до 110% номінального значення.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики апарату АЗУР.4ПП

Характеристика	Значення
Номінальна напруга трифазної мережі, що захищається змінного струму частотою 50 Гц, В	660/1140
Споживана потужність, кВ*А, не більше	0,025
Зміна ємності мережі, мкФ на фазу	від 0 до 1,0
Опір спрацьовування при симетричному трифазному витоку, кОм на фазу, не менше: при напрузі мережі 660 В при напрузі мережі 1140 В	30 60
Опір спрацьовування при однофазному витоку, кОм, не більше: при напрузі мережі 660 В при напрузі мережі 1140 В	20 50
Величина тривалого струму витоку при зміні ємності мережі від 0 до 1 мкФ на фазу, А, не більше	0,025
Компенсація ємнісної складової струму витоку та шунтування пошкодженої фази малим опором на землю в діапазоні зміни ємності мережі від 0,1 до 1 мкФ має знижувати короткочасний струм до величини, А, не більше	0,1

Продовження таблиці 1.1

Характеристика	Значення
Опір автоматичного деблокування в режимі попереджувального контролю та блокування, від опору спрацювання, %, не більше	150
Власний час спрацювання апарату захисту від струмів витоку при опорі однофазного витоку 1,0 кОм та ємності мережі від 0 до 1,0 мкФ на фазу, с, не більше	
основного захисту	0,07
резервного захисту	0,2
Власний час спрацювання апарату захисту від струмів витоку при зниженні напруги на затискачах до 0,6 номінальної напруги мережі, обумовленого виникненням міжфазних дугових замикань з торканням дугою стінок оболонки електрообладнання, с, не більше	0,1
Час шунтування пошкодженої фази на землю з моменту появи однофазного витоку та ємності мережі від 0 до 1,0 мкФ на фазу, с, не більше	0,17
Середній термін служби до списання, років, не менше	5
Габаритні розміри апарату захисту, (ширина x висота x глибина), мм	274x320x23
Маса апарату захисту, кг, не більше	13

Апарат захисту виконує функцію самоконтролю справності елементів кола контролю ізоляції та захисного відключення.

1.3 Будова та принцип дії апарату АЗУР.4ПП

Апарат АЗУР.4ПП конструктивно виконаний у вигляді блоку, що встановлюється у розподільчі пристрої нижчої напруги трансформаторних пересувних підстанцій. Апарат захисту впливає на розчіплювач нульової напруги та незалежний розчіплювач автоматичного вимикача пересувної трансформаторної підстанції. При неспрацьовуванні автоматичного вимикача, апарат захисту видає сигнал на відключення високовольтної комірки, що живить цю підстанцію. Апарат захисту складається із виїмної частини, закритої металевим корпусом (рис 1.4).

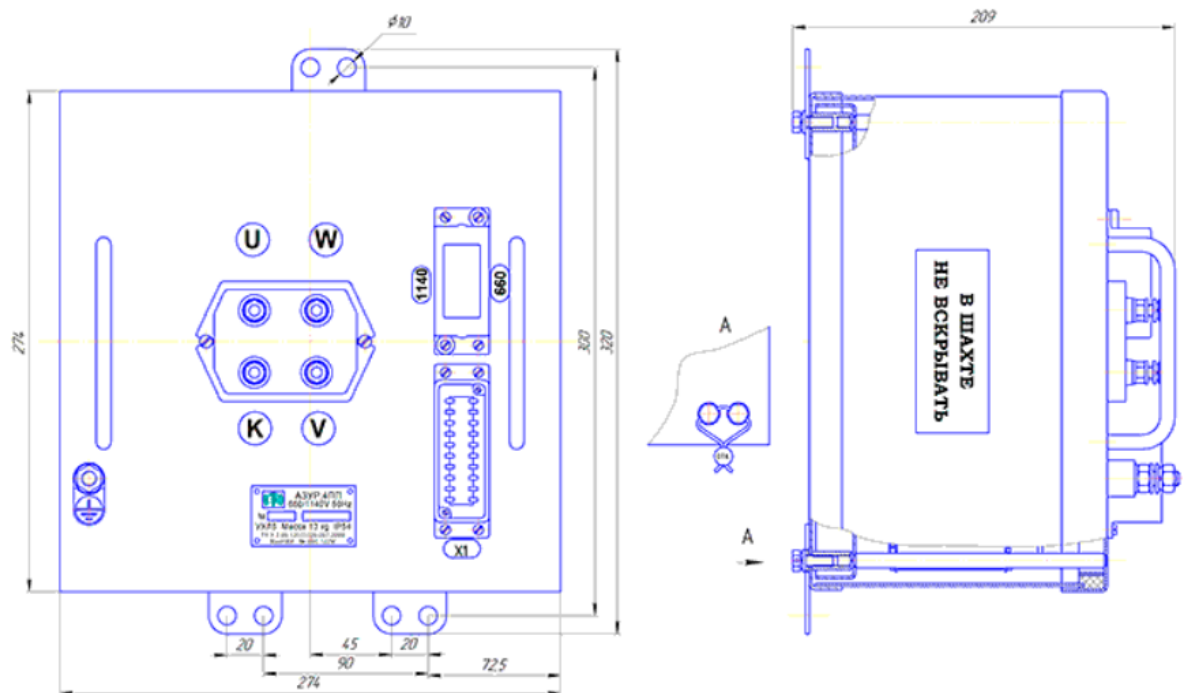


Рисунок 1.4 – Габарити апарату АЗУР.4ПП

На лицьовій панелі апарата захисту встановлено штепсельний роз'єм, струмопровідні та заземлюючі затискачі для підключення апарата до трансформаторної підстанції. На корпусі є кронштейни для кріплення апарата до камери підстанції.

Електрична схема апарата захисту містить такі основні вузли:

- а) пристрій контролю опору ізоляції мережі;
- б) пристрій компенсації струмів витоку;
- в) пристрій вибору та шунтування пошкодженої фази мережі.

Пристрій контролю опору ізоляції мережі містить джерела живлення оперативної та еталонної напруги, виконаних на трансформаторі, випрямлячі на діодах та конденсаторах, вимірювальні органи на компараторах (швидкодіючий та повільнодіючий), виконавчий орган на базі реле, генератора підвищеної частоти та приєднувального трансформатора. Пристрій компенсації струмів витоку виконано на базі статичного компенсатора (дроселя). Пристрій пошкодженої фази виконаний на компараторах, вихід яких підключений до пристроїв шунтування витоку малим опором з допомогою реле.

1.4 Інтерфейс RS-485 та протокол Modbus RTU

У шахтно-гірничій промисловості важливим аспектом є не лише забезпечення електробезпеки, але й ефективна передача даних для моніторингу та управління технологічними процесами. Для цього в умовах шахт часто використовуються промислові інтерфейси та протоколи передачі даних, які забезпечують надійність комунікацій у суворих умовах експлуатації, де високі рівні електромагнітних перешкод, волога, пил та обмежений простір можуть ускладнювати роботу традиційних систем. Одним із найбільш поширених рішень для організації зв'язку між різними пристроями і системами у таких середовищах є інтерфейс RS-485 та протокол Modbus RTU.

Інтерфейс RS-485 є одним з найбільш використовуваних стандартів для передачі даних у промислових умовах, включаючи шахти. Цей стандарт характеризується можливістю передавати дані на великі відстані (до 1,2 км) та підтримкою високих швидкостей передачі (до 10 Мбіт/с)(рис 1.5). Однією з

ключових переваг RS-485 є його стійкість до електромагнітних перешкод і можливість передачі даних по двопровідній або чотирипровідній лінії.

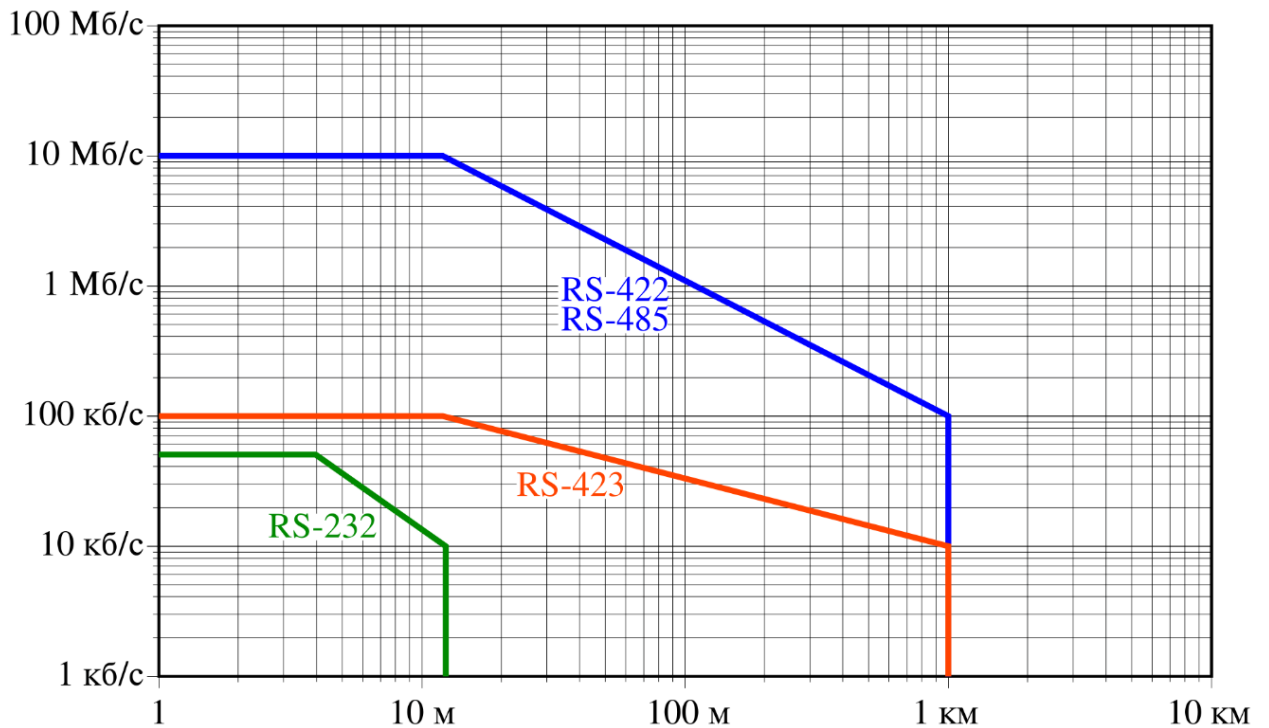


Рисунок 1.5 – Порівняння швидкостей передачі в залежності від довжини лінії для інтерфейсів RS-232, RS-422, RS-423, RS-485

Особливості RS-485:

а) багатоточкова розгалужена архітектура: RS-485 підтримує підключення до 32 пристроїв на одну лінію, що дозволяє використовувати його для побудови розгалужених мереж з великою кількістю кінцевих пристроїв. Це важливо для великих шахт, де потрібно об'єднати багато датчиків, контролерів та іншого обладнання (рис 1.6);

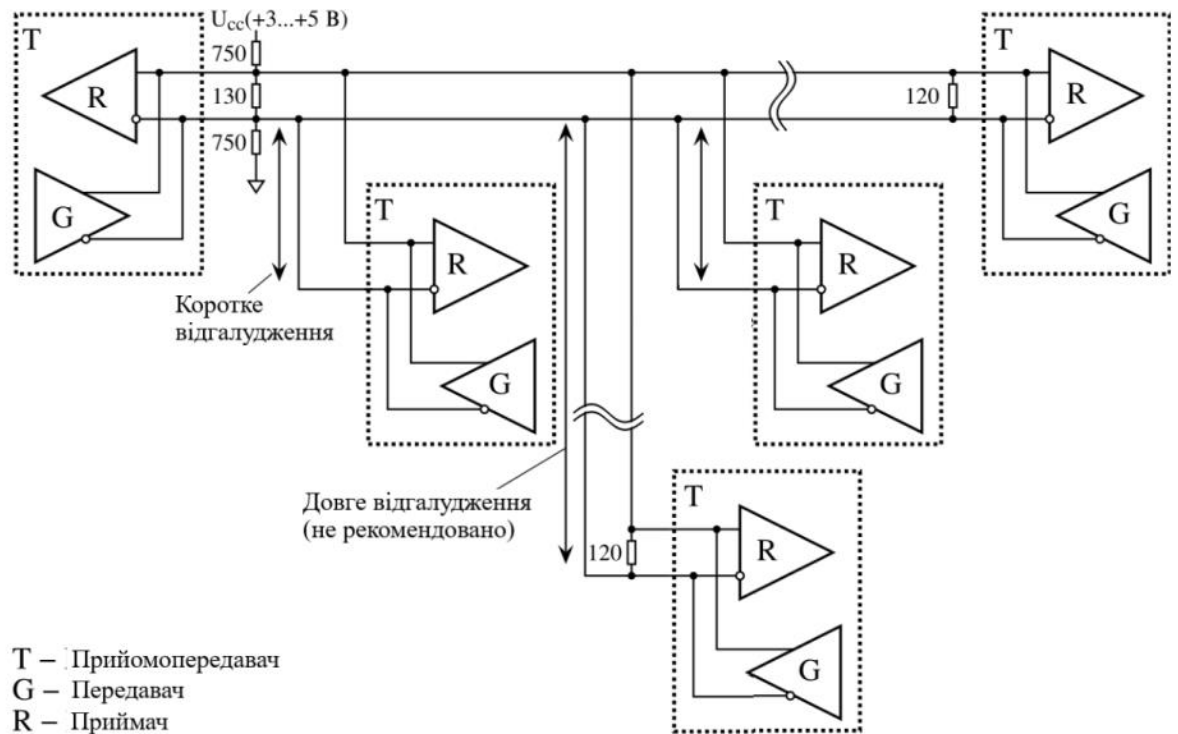


Рисунок 1.6 – Приклад мережі RS-485. Показано кілька приймачів і нерекомендоване довге відгалуження

- б) диференційна передача сигналу: Завдяки використанню диференційного сигналу (передача відбувається через дві лінії, які передають інверсні сигнали), RS-485 забезпечує стійкість до шумів та перешкод, що особливо важливо в умовах шахт з їх складною електромагнітною обстановкою (рис 1.7);
- в) надійність і безпека: Інтерфейс забезпечує стабільну роботу навіть при наявності великих електромагнітних перешкод, що є критичним для забезпечення безперервної роботи систем моніторингу та управління у шахтних умовах.

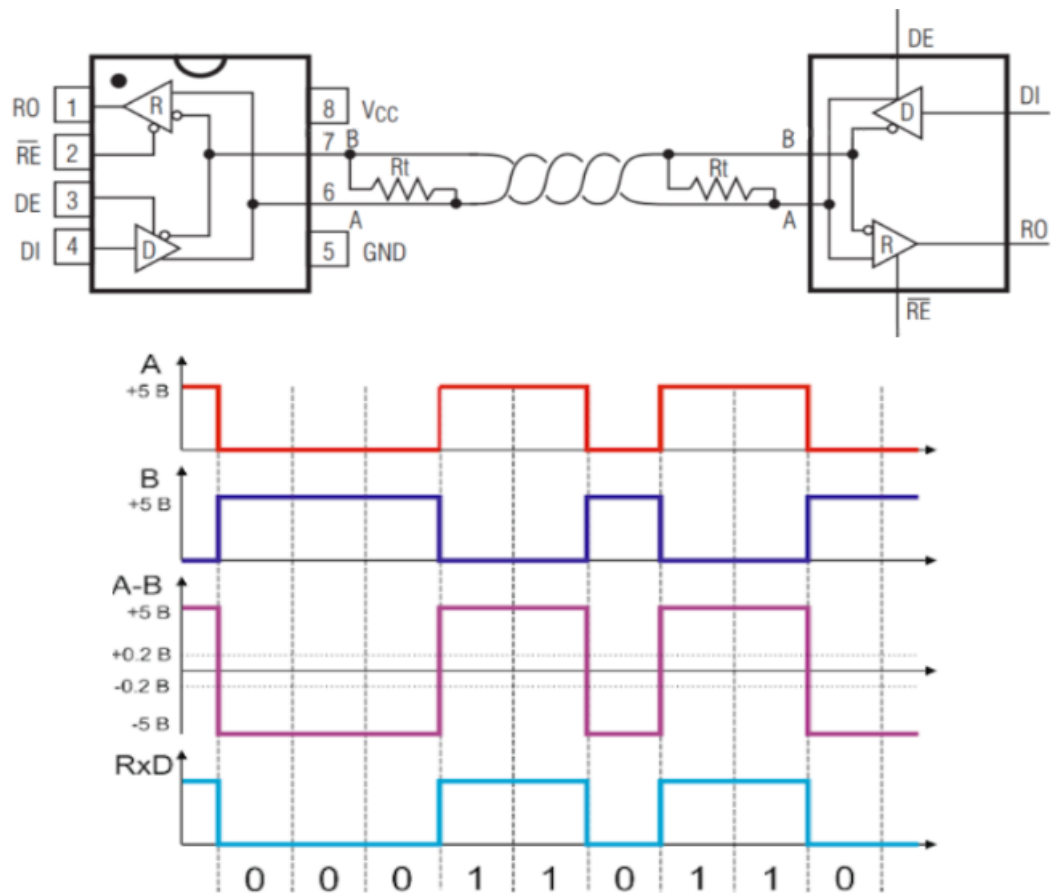


Рисунок 1.7 – Передача через дві лінії та утворення сигналу

RS-485 широко використовується в умовах, де важливо забезпечити ефективну передачу даних між різними пристроями, такими як контролери, датчики стану ізоляції, пристрої захисту від струмів витоку тощо.

Пристрої найчастіше знаходяться на великій відстані один від одного, тому зазвичай потрібна гальванічна розв'язка, функції якої – розрив загального "земляного" кола, захист усієї системи від високовольтних перехідних процесів, зменшення перешкод та спотворень сигналів, а також збільшення ступеня електробезпеки (рис 1.8).

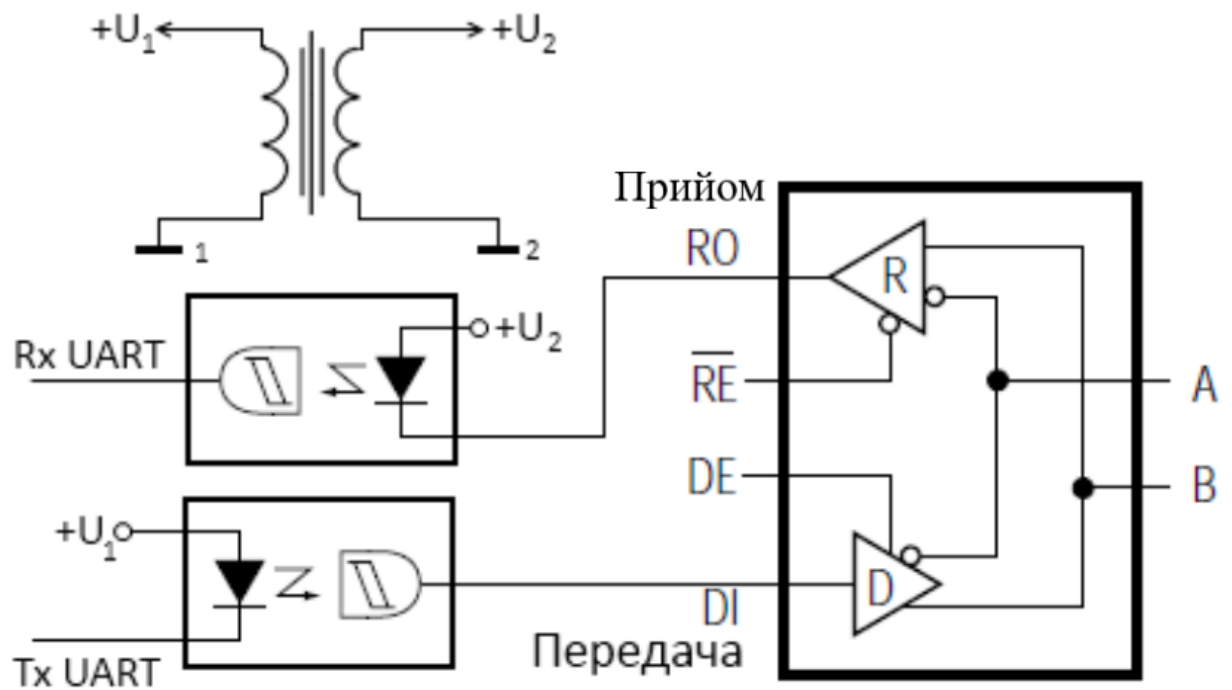


Рисунок 1.8 – Схема гальванічної розв'язки для інтерфейсу RS-485

Для організації ефективної передачі даних поверх фізичного інтерфейсу RS-485 найчастіше використовується протокол Modbus RTU. Modbus RTU — це відкритий протокол передачі даних, який був розроблений для обміну інформацією між контролерами та іншими пристроями в промислових мережах. Цей протокол став стандартом для обміну даними між промисловим обладнанням завдяки своїй простоті, надійності та універсальності.

Особливості Modbus RTU:

- а) структура даних: Протокол Modbus RTU використовує структуру кадру, де інформація передається у вигляді послідовності байтів. Кожен кадр містить адресу пристрою (slave), функціональний код, дані та контрольну суму для перевірки коректності передачі. Така структура забезпечує надійну передачу даних, навіть при наявності перешкод (рис1.9);

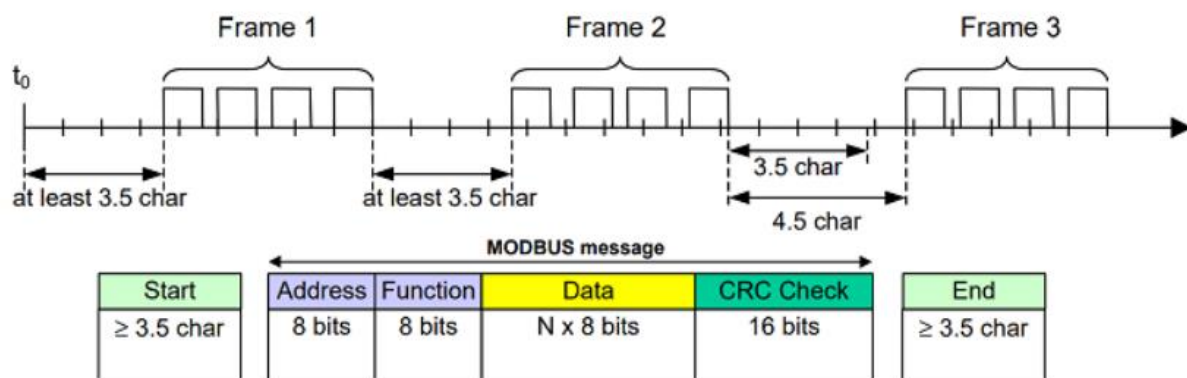


Рисунок 1.9 – Структура даних протоколу Modbus RTU

б) запит-відповідь: Протокол функціонує за принципом "майстер-слайв" (master-slave), де один головний пристрій (майстер) посилає запити, а підлеглі пристрої (slave) відповідають на них. Це дозволяє організувати централізоване управління мережею, де майстер-контролер отримує інформацію від різних пристроїв і забезпечує їх синхронну роботу;

в) широкий діапазон застосувань: Modbus RTU підходить для різних задач, таких як збір даних з датчиків, управління приводами, моніторинг стану систем захисту від струмів витоку та інших критично важливих пристроїв у шахтах;

г) низькі вимоги до ресурсів: Протокол Modbus RTU є ефективним і не вимагає значних обчислювальних ресурсів, що дозволяє використовувати його на простих пристроях із обмеженими можливостями обробки даних.

У шахтах RS-485 і Modbus RTU використовуються для передачі даних між різними елементами автоматизованих систем управління, такими як системи контролю стану електричних мереж, вентиляційні системи, датчики газу, системи контролю температури та вологості, а також обладнання для забезпечення електробезпеки. Наприклад, пристрої для контролю ізоляції та захисту від струмів витоку можуть передавати інформацію про стан мережі через RS-485 з використанням протоколу Modbus RTU до центрального контролера, який забезпечує моніторинг та оперативне управління системами безпеки.

Інтерфейс RS-485 та протокол Modbus RTU забезпечують стабільну роботу навіть у складних умовах, що є важливим для безперервної експлуатації шахт, де простій обладнання може призвести до значних фінансових втрат і ризиків для життя працівників. Надійність таких рішень дозволяє здійснювати постійний моніторинг стану систем і швидко реагувати на можливі аварійні ситуації.

1.5 Іскробезпечні кола

У шахтних умовах, де присутні вибухонебезпечні газові суміші та пил, особливої уваги заслуговує питання безпеки електричних мереж. Оскільки навіть найменший електричний розряд може спричинити займання, системи передачі даних, такі як інтерфейс RS-485, повинні використовувати іскробезпечні кола. Це необхідно для обмеження електричної енергії, що передається в колі, до рівня, при якому виключається можливість виникнення іскри або нагрівання, здатних спричинити вибух.

Іскробезпечні кола проектуються так, щоб обмежити параметри електричної енергії — напругу, струм і потужність — до безпечних рівнів. Основне завдання полягає в тому, щоб за будь-яких умов експлуатації, включаючи аварійні ситуації, не допустити виділення іскри чи теплового імпульсу, здатного запалити вибухонебезпечну суміш.

Основні параметри, що впливають на іскробезпеку:

- а) максимальна напруга (U_{\max}) — обмежує потенційну різницю напруги між елементами кола;
- б) максимальний струм (I_{\max}) — визначає струм, що протікає в колі;
- в) енергія (W) — продукт напруги, струму та часу протікання струму, який не повинен перевищувати критичне значення для займання вибухонебезпечної атмосфери.

Для оцінки мінімальної енергії іскри, здатної запалити газопилову суміш у шахті, використовуються емпіричні дані та нормативи. Ці дані отримуються в результаті численних експериментів і враховують різні фактори, що впливають на процес займання

Отже спрощена формула, яка дає приблизне уявлення про енергію іскри:

$$E = kU^2d, \quad (1.4)$$

де E – енергія іскри (Дж),

k – коефіцієнт, що залежить від властивостей газової суміші та умов експерименту (зазвичай визначається емпірично),

U – напруга пробною (В),

d – розрядний проміжок (м).

Для уникнення займання необхідно, щоб максимальна енергія, що виділяється в колі, була меншою за критичну енергію запалювання, яка визначається для кожного типу вибухонебезпечної атмосфери.

Для гарантії іскробезпеки в колах інтерфейсу RS-485 необхідно провести ретельний розрахунок максимальних значень електричних параметрів. Ці розрахунки повинні враховувати як нормальні, так і аварійні режими роботи системи.

Розрахунок максимального струму (I_{\max}): максимальний струм, що може протікати в іскробезпечному колі, залежить від типу використовуваних елементів і напруги живлення. Для уникнення займання струм повинен бути обмеженим так, щоб енергія виділення була нижчою за критичну. Для обмеження струму застосовують резистори та інші пасивні елементи. Припустимо, що номінальна напруга системи становить $U=24\text{В}$, а обмеження по струму визначають за формулою:

$$I_{max} = \frac{U}{R}, \quad (1.5)$$

де R — загальний опір кола.

Для обмеження струму до безпечного рівня $I_{max}=50\text{мА}$, опір повинен бути не менше:

$$R = \frac{U}{I_{max}} = \frac{24\text{В}}{50\text{мА}} = 480 \text{ Ом}. \quad (1.6)$$

Розрахунок енергії, що виділяється: максимальна енергія, що виділяється в колі під час короткого замикання або іншої аварії, повинна бути обмежена до рівня, який не здатен викликати займання. Енергія визначається за формулою:

$$W = \frac{1}{2} C U_{max}^2, \quad (1.7)$$

де C — ємність кола.

Для забезпечення безпеки ємність повинна бути обмежена. Наприклад, якщо $U_{max}=24$, а критична енергія для займання метану становить $W_{кр}=0.2\text{Дж}$, тоді максимально допустима ємність:

$$C = \frac{2W_{кр}}{U_{max}^2} = \frac{2 \times 0.2\text{Дж}}{(24\text{В})^2} = 0,694 \times 10^{-3}\text{Ф}. \quad (1.8)$$

Це означає, що загальна ємність кола не повинна перевищувати 694мкФ .

Розрахунок потужності розряду: потужність, що виділяється під час короткого замикання, також повинна бути обмежена. Потужність визначається за формулою:

$$P = U_{max} \times I_{max}. \quad (1.10)$$

Для напруги $U_{max}=24\text{В}$ і струму $I_{max}=50$, потужність розряду становитиме:

$$P = 24\text{В} \times 50\text{мА} = 1,2\text{Вт}. \quad (1.11)$$

Це значення повинно бути порівняне з критичною потужністю займання вибухонебезпечної атмосфери.

Іскробезпечні кола проектуються згідно з вимогами міжнародних і національних стандартів, які встановлюють критерії безпеки для вибухонебезпечних середовищ. Ці стандарти регламентують рівні допустимих параметрів електричних кіл, методи тестування та конструктивні вимоги для забезпечення іскробезпеки.

IEC 60079-11 — міжнародний стандарт, що визначає вимоги до іскробезпечних систем для використання у вибухонебезпечних середовищах. Він регламентує максимальні допустимі значення напруги, струму та потужності для електричних кіл і обмежує енергетичні параметри таким чином, щоб запобігти виникненню іскри. Відповідно до цього стандарту, системи повинні проходити випробування на витривалість до коротких замикань і перешкод.

EN 60079-25 — європейський стандарт, що охоплює конструкцію та випробування електричних систем з іскробезпечним захистом. У ньому детально описуються вимоги до бар'єрів іскробезпеки, зокрема до обмеження енергетичних параметрів та перевірки на стійкість до перенапруг.

ANSI/ISA-12.02.01 — стандарт, що визначає методи забезпечення іскробезпеки для промислових систем у США. Він охоплює іскробезпечні схеми для систем передачі даних і регламентує вимоги до захисних пристроїв, таких як супресори перенапруг, варистори та гальванічні розв'язки.

Дотримання цих стандартів забезпечує високу надійність і безпеку роботи систем в умовах вибухонебезпечної атмосфери. Усі електричні системи, що використовуються в шахтах, повинні проходити сертифікацію згідно з вищезазначеними стандартами.

Забезпечення іскробезпеки в колах інтерфейсу RS-485 є важливою умовою безпечної експлуатації електричних систем у вибухонебезпечних середовищах. Розрахунок параметрів кола, таких як максимальна напруга, струм і енергія, повинен враховувати як нормальні умови роботи, так і можливі аварійні ситуації. Дотримання міжнародних стандартів і використання захисних пристроїв, таких як бар'єри іскробезпеки та гальванічна розв'язка, дозволяє мінімізувати ризики займання та гарантувати безпечну роботу систем передачі даних у шахтах та інших вибухонебезпечних середовищах.

2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ ПЛАТИ КЕРУВАННЯ ДЛЯ ПРИЛАДУ АЗУР.4ПП

2.1 Спектр вимірюваних параметрів цифрової плати

Цифрова плата, інтегрована в апарат АЗУР, призначена для здійснення високоточної аналого-цифрової конвертації сигналів та збору даних про основні параметри електромережі. Завдяки використанню сучасного мікроконтролера та периферійних модулів, плата гарантуватиме швидке оцифрування аналогових сигналів, їх обробку та передачу в цифровому форматі. Це дозволяє отримати детальну інформацію про стан електромережі та роботу самого пристрою, необхідну для ефективного моніторингу, діагностики та управління системою електропостачання.

Серед ключових параметрів, які збиратиме та оброблятиме плата, можна виділити наступні:

- а) стан реле напруги — дозволяє відстежувати обрану уставку (660В/1140В), щоб запобігти перевантаженню;
- б) фактичний рівень напруги — вказує на реальний показник напруги в даний момент, що дозволяє моніторити робочі умови і їх відповідність допустимим значенням;
- в) наявність високої напруги — визначає в якому саме режимі працює апарат (режим попереднього контролю ізоляції чи робота реле витоку), що забезпечує оцінку наявності небезпечного напруження в системі;
- г) різниця уставки та робочого сигналу — дає можливість вирахувати поточний опір ізоляції з допустимою похибкою, що дозволяє своєчасно виявити критичні відхилення;

- д) стан основного робочого реле та шунтуючих реле — забезпечує інформацію про те, чи апарат перебуває в стані норми або аварійного відключення, а також яка фаза вибрана та зашунтована у разі пошкодження;
- е) контроль кнопки “Перевірка” — дозволяє визначити, чи відключення сталося внаслідок перевірки або через аварійне спрацювання системи;
- є) стан додаткового заземлювача (ДЗ) — відстежує наявність заземлення, що є обов'язковим для підтримання безпеки електроустановок.

Цей набір параметрів дозволяє в достатній мірі не тільки забезпечити захист персоналу та обладнання, а й сприяє ефективному управлінню роботою системи електропостачання в складних умовах шахтного середовища.

2.2 Визначення оптимальних точок зняття параметрів у схемі апарату

Аналіз електричної схеми апарата АЗУР.4ПП є ключовим етапом у процесі оптимізації збору інформації про електричні параметри, які характеризують роботу пристрою в реальному часі. Визначення оптимальних точок зняття параметрів має важливе значення для забезпечення точності вимірювань та швидкості реагування на зміни в електричній мережі.

Розглянута схема апарата АЗУР.4ПП складається з комплексного набору електричних компонентів, включаючи інтегровані схеми, реле, трансформатори, фільтри та засоби захисту, що визначає необхідність ретельного аналізу при виборі контрольних точок для зчитування критичних параметрів. У зв'язку з цим, ключовими факторами, що впливають на точність вимірювань, є конфігурація мережі, електричні характеристики компонентів, а також навколишнє середовище, що може створювати електромагнітні перешкоди.

Для забезпечення високої точності вимірювань напруги, струму та опору необхідно враховувати специфіку шахтних умов експлуатації, де може відбуватися вплив таких факторів, як вологість, температура, механічні вібрації та наявність

пилу. Це підвищує вимоги до місць зняття даних: необхідно забезпечити, щоб параметри сигналу мали низький рівень перешкод, що може бути досягнуто через правильне розташування сенсорів, використання екранізуючих матеріалів та адаптацію схем передачі сигналів.

Дослідження процесу вибору точок зняття параметрів у цьому розділі включає глибокий аналіз основних вузлів апарата, зокрема:

- а) вузли живлення: Важливість контролю напруги живлення та стабільності струму в системі, що забезпечує роботу всіх електронних компонентів, які критично залежать від умов електроживлення. Оцінка напруги та струму в цих точках є необхідною для діагностики можливих відхилень у роботі апарата;
- б) елементи ізоляції: Необхідно оцінити якість та стан ізоляційних матеріалів, що використовуються в схемі. Це забезпечує захист від небажаних витоків струму, які можуть призвести до аварійних ситуацій. Контроль опору ізоляції в ключових точках допоможе запобігти виникненню короткого замикання;
- в) реле та їх стан: Аналіз роботи реле, яке відповідає за управління та контроль сигналів, має суттєве значення. Особливу увагу слід приділити контролю стану реле напруги, що визначає актуальні рівні напруги в мережі, а також різності уставки та робочого сигналу. Це дозволить своєчасно виявити можливі відхилення або несправності;
- г) додаткові заземлювачі: Контроль стану додаткових заземлювачів (ДЗ) є критично важливим для забезпечення іскробезпечності. Оцінка їх ефективності та наявності допоможе мінімізувати ризики, пов'язані з електричними розрядами та потенційними аварійними ситуаціями;
- д) у процесі детального аналізу електричної схеми апарата АЗУР.4ПП для забезпечення стабільного живлення плати була визначена оптимальна точка з постійною напругою 8,6 В. Ця точка в схемі обрана завдяки високій стабільності напруги в умовах коливань у мережі та мінімальному рівню перешкод, що забезпечує надійну роботу плати в умовах шахтного середовища.

Для живлення нашої цифрової плати напруга з цієї точки була виведена та підключена до лінійного стабілізатора напруги, який забезпечує стабільне зниження напруги до рівня 5 В. Вибір лінійного стабілізатора пояснюється його здатністю згладжувати високочастотні коливання та зменшувати електромагнітні перешкоди, що є важливим у системах з високими вимогами до іскробезпеки. Для додаткової стабілізації напруги після стабілізатора застосовуються згладжувальні конденсатори, які мінімізують пульсації напруги та забезпечують безперебійне живлення цифрових компонентів плати.

Таким чином, вихідна напруга 5 В після стабілізації на платі є високонадійною та стабільною, що дозволяє ефективно жити мікроконтролер та периферійні елементи, мінімізуючи ризик відмови через нестабільність напруги.

Для реалізації надійного контролю обраної уставки в системі захисту апарата АЗУР.4ПП, а також для запобігання потенційному перенавантаженню обладнання, було визначено оптимальну контрольну точку, яка дозволяє точно визначати активну уставку (660 В чи 1140 В) через інтеграцію з цифровою платою.

Для реалізації гальванічної розв'язки між високовольтною частиною схеми та низьковольтним ланцюгом управління використовується оптрон. Напруга з контрольної точки подається на вхід оптрона, де вона збуджує світлодіод, забезпечуючи необхідне відокремлення та ізоляцію сигналу, що критично важливо для роботи в умовах шахт, де присутні вимоги до іскробезпеки.

На виході оптрона, через резисторний дільник, реалізовано підтяжку до 5 В, яка забезпечує сумісність сигналу з рівнями, що відповідають вимогам контролера.

Цей підхід дозволяє приймати чіткий цифровий сигнал, де:

- а) при уставці 660 В на контролері фіксується логічний рівень «1» (5 В);
- б) при уставці 1140 В — логічний рівень «0» (0 В).

Таким чином, залежно від уставки, контролер зчитує значення на відповідному вході й обробляє сигнал для запобігання перенавантаженню апарата.

Для отримання достовірного сигналу про наявність і рівень високої напруги в апараті було обрано точку, що є виходом трифазного діодного моста, дільника напруги та фільтрації. Трифазний діодний міст виконує випрямлення змінного струму мережі, забезпечуючи постійну напругу, яка є стабільною основою для подальшого аналізу. Використання випрямленого сигналу знижує вплив коливань мережі, підвищуючи точність оцінки напруги та стабільність отриманих даних.

Дільник напруги, що застосовується після випрямляча, налаштований на точне масштабування сигналу до рівня, сумісного з вхідними характеристиками оптрона. Паралельно з дільником встановлено фільтруючі елементи — низькочастотний RC-фільтр, який усуває залишкові пульсації після випрямлення, та фільтр високих частот для мінімізації впливу потенційних перешкод, викликаних індуктивністю довгих проводів та іншими шумами. Це забезпечує чистий, фільтрований сигнал, що відповідає реальним параметрам мережевої напруги в різних робочих режимах апарата.

Сигнал з цієї точки через обмежувальний резистор подається на вхід оптрона, на виході якого використовується підтяжка до 5 В. Залежно від отриманого на контролері значення, можна визначити як наявність високої напруги, так і її рівень:

- а) при сигналі 5 В контролер визначає, що висока напруга відсутня, і апарат працює в режимі попереднього контролю ізоляції;
- б) при зменшенні рівня напруги контролер визначає, що висока напруга подана, тобто апарат працює в режимі реле витоку. Рівень 4,6 В на ніжці контролера відповідає напрузі мережі 380 В, рівень 3,6 В відповідає напрузі мережі 660 В, а рівень 1,4 В – напрузі мережі 1140 В.

Для контролю різниці між заданою уставкою та фактичним робочим сигналом було обрано точку в схемі, розташовану на виході дроселя, де формується достатній рівень напруги для подальшого контролю.

Сигнал з точки виходу дроселя проходить через дільники напруги, які знижують рівень сигналу до безпечних значень, допустимих для введення в

аналогову частину схеми. Дільники напруги були спеціально налаштовані для відповідності вимогам точності та лінійності, що мінімізує похибку у визначенні різниці між уставкою та реальними значеннями напруги. Для подальшого покращення чистоти сигналу в схемі використано фільтри: низькочастотний RC-фільтр відсікає сторонні пульсації, а високочастотний фільтр знижує вплив можливих перешкод від роботи інших компонентів апарата.

Після фільтрації сигнал проходить через струмообмежуючі резистори, що захищають вхідну частину контролера від стрибків струму та забезпечують стабільну подачу сигналу. Далі сигнал проходить через додатковий дільник напруги для точного налаштування рівнів, сумісних з вимогами мікроконтролера, а також через згладжуючі конденсатори, що забезпечують додаткову стабілізацію напруги на вході контролера.

З метою безпеки та захисту елементів схеми був встановлений супресор, який захищає від перенапруги та імпульсних перешкод, що можуть виникати у шахтному середовищі. Супресор діє як захисний бар'єр, миттєво реагуючи на імпульсні перевантаження, що дозволяє зберегти точність сигналу та запобігає можливому пошкодженню елементів схеми.

Після всіх цих етапів обробки сигнал надходить безпосередньо на вхід мікроконтролера, де він обробляється для визначення різниці між поточною напругою та заданою уставкою. Цей метод дозволяє точно визначити поточний опір ізоляції, а також виявляти критичні зміни, що вказують на зниження рівня ізоляції і потребу в негайному втручанні для забезпечення безпеки системи. Також, важливо зазначити, що з цієї точки можливо здійснювати контроль за станом додаткового заземлювача (ДЗ). Це дозволяє своєчасно фіксувати можливі несправності заземлення. Зокрема, якщо напруга на відповідній ніжці контролера знизиться до 0 В, це свідчатиме про обрив додаткового заземлювача, що може вказувати на порушення в ланцюзі заземлення.

Було проведено заміри напруги в точці, де сигнал надходить на вхідну ніжку контролера. Ці вимірювання дали змогу встановити залежність напруги на ніжці контролера від рівня опору ізоляції в мережі. На основі отриманих результатів побудовано таблицю відповідності напруги на ніжці контролера до значень опору ізоляції, що дозволить у подальшому забезпечити ефективну програмну обробку сигналу мікроконтролером. Таблиця 2.1 стане основою для алгоритмів моніторингу та діагностики стану ізоляції, які враховуватимуть як стандартні, так і критичні відхилення параметрів.

Таблиця 2.1 – Відповідність напруги на ніжці контролера до значень опору ізоляції

Опір ізол., кОм	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Нап. (БРВ), В	3,99	3,8	3,63	3,47	3,33	3,21	3,1	3	2,9	2,81
Нап. (РВ), В										
Опір ізол., кОм	10	11	12	13	14	15	20	25	30	35
Нап. (БРВ), В	2,75	2,67	2,69	2,53	2,47	2,41	2,16	1,97	1,82	1,7
Нап. (РВ), В							1,33	1,32	1,12	1,05

Продовження таблиці 2.1

Опір ізол., кОм	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
Нап. (БРВ), В	1,6	1,5	1,43	1,37	1,32	1,28	1,23	1,19	1,16	1,14
Нап. (РВ), В	0,99	0,94	0,9	0,86	0,83	0,8	0,77	0,75	0,73	0,72
Опір ізол., кОм	90	95	100	150	200	250	300	350	400	450
Нап. (БРВ), В	1,11	1,08	1,05	0,91	0,83	0,78	0,75	0,72	0,7	0,69
Нап. (РВ), В	0,7	0,68	0,67	0,58	0,53	0,5	0,47	0,46	0,45	0,68

На основі отриманої таблиці залежності напруги на ніжці контролера від опору ізоляції мережі було побудовано графік (рис 2.1), який наочно відображає характер цієї залежності. Графік дозволяє візуалізувати зміну напруги залежно від опору ізоляції, що сприяє кращому розумінню динаміки процесу та спрощує подальший аналіз. Такий підхід забезпечує зручність у налаштуванні програмного забезпечення мікроконтролера для точного визначення критичних порогів та виконання коректної діагностики стану електромережі.

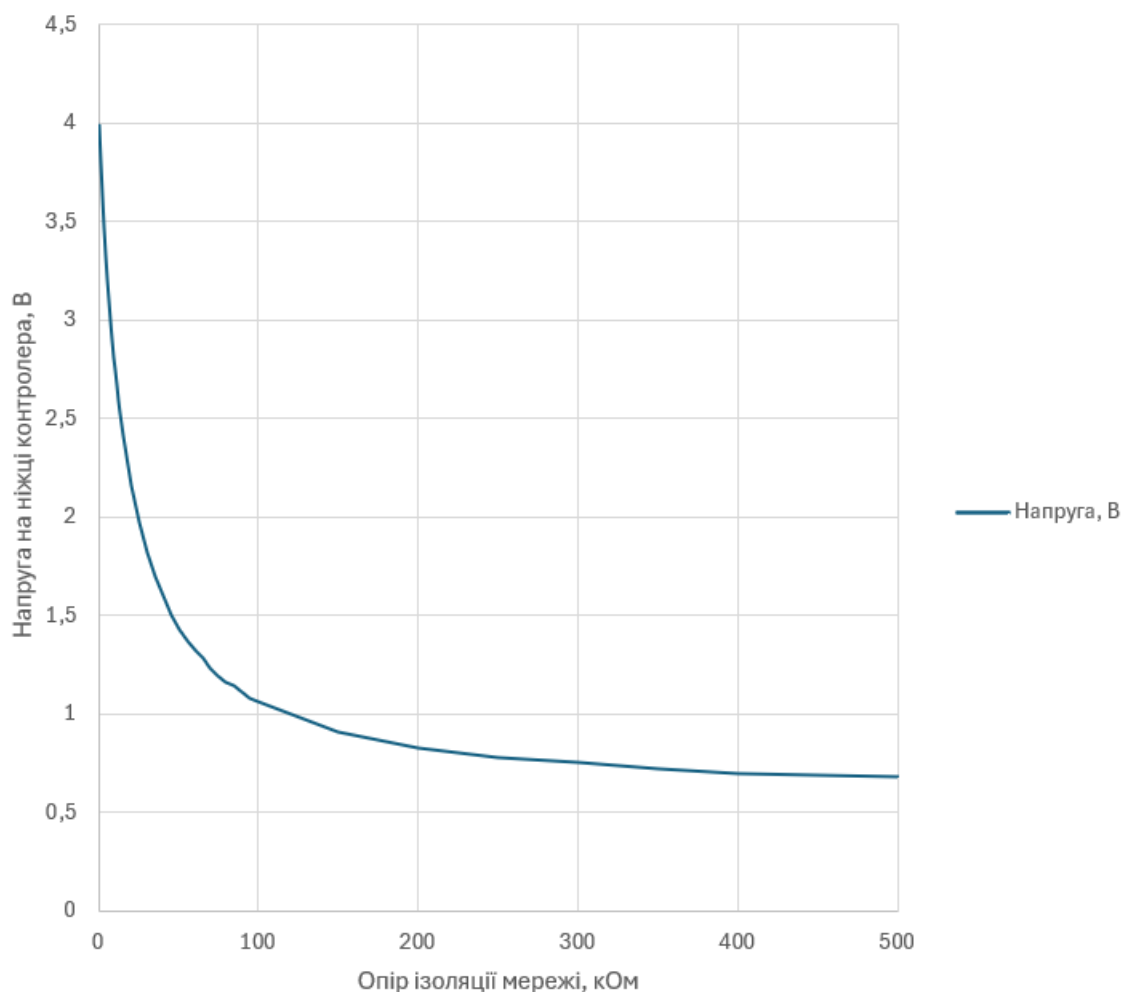


Рисунок 2.1 – Залежності напруги на ніжці контролера від опору ізоляції мережі

Для отримання інформації про поточний режим апарата (штатний чи аварійний) та індикацію фази, яка зашунтована в разі виявлення пошкодження, відповідно до проведеного аналізу було обрано контрольні точки, що забезпечують зчитування стану цих реле за допомогою гальванічно розв'язаних оптичних елементів.

Для контролю основного робочого реле зчитується напруга з котушки реле. З цієї точки сигнал через струмообмежуючий резистор подається на вхід оптрона, а вихід оптрона з підтяжкою до 5 В надходить на контролер. Завдяки такому підключенню, якщо на контролер надходить сигнал 5 В, це вказує на те, що реле

перебуває у стані норми. Якщо сигнал на контролері знижується до 0 В, це означає, що реле “відпало”, і апарат перейшов у аварійний режим, що вимагає негайного втручання.

Для контролю стану кожного з шунтуючих реле було обрано вільні перекидні контакти, на яких при спрацюванні реле (шунтуванні) з’являється напруга 42 В. Цей сигнал через струмообмежуючі резистори та оптрони з підтяжкою до 5 В надходить на контролер, забезпечуючи гальванічну розв’язку для безпечної роботи. Кожне шунтуюче реле має свою лінію на контролері, яка вказує стан відповідної фази: при надходженні сигналу 5 В реле перебуває в нормальному стані, і жодна з фаз не зашунтована. При зниженні сигналу до 0 В контролер індикує, що відповідне реле спрацювало та зашунтувало певну фазу, що може свідчити про виявлене пошкодження ізоляції або іншу аварійну ситуацію.

Таке підключення дозволяє відслідковувати спрацювання кожного шунтуючого реле окремо, розрізняючи фазу, яка була зашунтована, та надає оператору або системі управління чітке уявлення про стан реле й фаз, що забезпечує своєчасне виявлення та усунення несправностей, а також підтримує належний рівень ізоляції.

У випадку контролю за станом кнопки “Перевірка” реалізовано окремий підхід, що дозволяє визначити, чи відбулося відключення через аварійне спрацювання, або ж воно було ініційоване внаслідок перевірки. З обраної контрольної точки на схемі сигнал проходить через діодний міст, який забезпечує вирівнювання напруги, та подається на вхід оптрона, вихід якого має підтяжку до 5 В для подачі на ніжку контролера.

Виходячи з цього, система працює таким чином: якщо сигнал на нізці контролера становить 5В, то кнопка “Перевірка” не була натиснута, а отже, відключення системи слід вважати аварійним. Якщо ж рівень сигналу знижується до 0 В, це означає, що кнопка була натиснута, і спрацювання апарату сталося саме через перевірку.

Такий підхід дозволяє ефективно відстежувати статус кнопки “Перевірка”, а також оперативно і точно ідентифікувати тип спрацювання – аварійний або тестовий – що важливо для належного функціонування та обслуговування апарату АЗУР.4ПП.

2.3 Аналіз і обґрунтування вибору мікроконтролера

Для реалізації функцій контролю та обробки сигналів у платі було обрано мікроконтролер PIC18F14K22 (рис 2.2) із сімейства PIC. Це рішення було прийняте на основі його технічних характеристик, які повністю відповідають вимогам нашої системи.

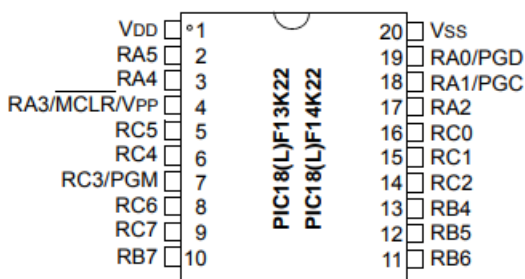


Рисунок 2.2 – Призначення ніжок мікроконтролера PIC18F14K22

Основні переваги PIC18F14K22:

- висока продуктивність. Мікроконтролер побудований на базі 8-розрядної архітектури з використанням розширеного набору команд, що забезпечує високу швидкість виконання операцій. Максимальна тактова частота 16 МГц дозволяє ефективно обробляти сигнали в реальному часі;
- достатня кількість виводів введення/виведення. PIC18F14K22 має 18 виводів введення/виведення, які можна налаштовувати як цифрові чи аналогові. Це

забезпечує можливість підключення всіх необхідних сенсорів та реле для збору даних про стан апарату;

в) мікроконтролер обладнаний 10-розрядним АЦП із 12 каналами. Це дозволяє проводити точну обробку аналогових сигналів, що надходять від дільників напруги, фільтрів і оптронів;

г) енергоефективність PIC18F14K22 має низьке енергоспоживання, що є важливим для застосувань у шахтних умовах, де необхідно забезпечити стабільну роботу навіть у випадку аварійного живлення;

д) можливості апаратної реалізації протоколів передачі даних завдяки наявності апаратного модуля USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter) дозволяє здійснювати обмін даними через стандартний інтерфейс RS-485 із використанням протоколу Modbus RTU. Також завдяки апаратній підтримці USART забезпечується точність, стабільність і швидкість передачі даних, що є ключовим для моніторингу та управління апаратом в реальному часі;

е) достатній об'єм пам'яті. Програмна пам'ять (Flash): 16 КБ, що дозволяє зберігати складний програмний код для обробки сигналів і реалізації обчислювальних алгоритмів. Оперативна пам'ять (RAM): 768 байт, що достатньо для зберігання проміжних даних під час обчислень. EEPROM: 256 байт для зберігання конфігураційних даних, таких як уставки або порогові значення;

є) широкий діапазон живлення. Мікроконтролер підтримує роботу при напрузі живлення від 1,8 В до 5,5 В, що ідеально підходить для нашої системи, яка використовує стабілізоване живлення 5 В.

PIC18F14K22 забезпечує оптимальне співвідношення між функціональністю та вартістю, має всі необхідні апаратні ресурси для реалізації задач контролю і передачі даних, а також відповідає умовам роботи в шахтному середовищі завдяки високій надійності та енергоефективності. Для зв'язку плати з зовнішніми пристроями буде використовуватись модуль USART, який є інтегрованим в мікроконтролер. Цей модуль підтримує:

- а) асинхронний режим для реалізації інтерфейсу RS-485;
- б) автоматичне управління передачею та прийомом даних;
- в) налаштувану швидкість передачі, що дозволяє адаптувати систему до різних швидкостей протоколу Modbus RTU.

Наявність USART мінімізує програмне навантаження на мікроконтролер і гарантує стійкість передачі даних навіть у середовищі з високим рівнем електромагнітних завад, що характерно для шахт.

Таким чином, PIC18F14K22 є ідеальним вибором для нашої плати, забезпечуючи точність вимірювань, стабільність роботи та надійний обмін даними з зовнішніми системами.

2.4 Алгоритми програмної обробки отриманих даних

Програмна логіка роботи мікроконтролера базується на чіткому розподілі функціональності для обробки сигналів, що надходять на цифрові та аналогові входи. Для всіх цифрових входів (наприклад, стан реле, кнопка «Перевірка») програмна обробка виконується за простим принципом: перевіряється наявність логічного сигналу (0 або 1):

- а) якщо на цифровому вході виявлено високий рівень (логічна 1), це інтерпретується як активний стан сигналу;
- б) якщо на вході низький рівень (логічний 0), сигнал вважається неактивним.

Такий підхід дозволяє швидко та ефективно визначати стан підключених компонентів.

Окрім цифрових входів, апарат передбачає два аналогових входи. Один для аналізу наявності високої напруги та фактичного рівня напруги в мережі, другий для контролю опору ізоляції мережі. Ці аналогові сигнали забезпечують отримання детальної інформації про стан системи, що неможливо реалізувати за допомогою лише цифрових каналів. Для їх обробки використовується вбудований 10-

розрядний аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) мікроконтролера PIC18F14K22. АЦП виконує перетворення вхідного аналогового сигналу, який має амплітуду від 0 до 5 В, у цифровий код з діапазоном значень від 0 до 1023. Це дозволяє отримати дискретне представлення вхідної напруги.

Формула для визначення цифрового значення D на виході АЦП:

$$D = \frac{V_{in}}{V_{ref}} \times (2^n - 1), \quad (2.1)$$

де D — цифровий код (результат перетворення);

V_{in} — вхідна аналогова напруга;

V_{ref} — опорна напруга для АЦП (в нашому випадку $V_{ref} = 5\text{В}$);

n — розрядність АЦП (для 10-розрядного АЦП $n=10$).

У нашому випадку для забезпечення високої точності вимірювань, вбудований АЦП мікроконтролера виконує 75 циклів замірів за один напівперіод напруги мережі з частотою 50 Гц. Це дозволяє врахувати коливання напруги в межах синусоїдального сигналу та отримати інтегральне значення. Кожне окреме вимірювання додається до суми попередніх результатів, і кінцеве значення представляє суму 75 замірів за напівперіод. Таким чином, вихідне значення напруги V_{in} розраховане на основі суми вимірювань, визначається за формулою:

$$V_{in} = \frac{\sum_{i=1}^{75} D_i}{1023 \times 75} \times 5, \quad (2.2)$$

де D_i — значення АЦП на i -му циклі вимірювання;

1023 — максимальне значення 10-розрядного АЦП;

5 — еталонна напруга для АЦП (в Вольтах).

В рамках програмної обробки сигналу на аналоговому вході мікроконтролера реалізовано механізм чіткого розпізнавання чотирьох рівнів напруги, що відповідають різним режимам роботи апарату. Для цього визначені безперервні інтервали, що виключають можливість невизначеності. Сигнал, отриманий на аналоговому вході, являє собою напругу в межах від 0 до 5 В. Ця напруга формується відповідно до рівнів високої напруги в мережі:

- а) ідеутність високої напруги (режим попереднього контролю ізоляції): сигнал знаходиться у верхньому інтервалі напруги від 4,8 до 5,0 В;
- б) рівень 380 В: сигнал знижується до інтервалу від 4,05 до 4,7 В;
- в) рівень 660 В: сигнал падає в діапазон 2,45 – 4,05 В;
- г) рівень 1140 В: сигнал досягає найнижчого діапазону 0 – 2,45 В.

Для виключення будь-якої невизначеності між цими рівнями, межі переходу між інтервалами встановлюються в середніх точках між відповідними напругами.

Принципи роботи АЦП для другого каналу, який використовується для контролю ізоляції мережі, залишаються аналогічними: 10-розрядний АЦП виконує 75 циклів замірів за напівперіод напруги мережі 50 Гц, і результати цих вимірювань сумуються для отримання інтегрального значення напруги. Однак у цьому випадку необхідно врахувати, що сигнал на вході другого каналу відповідає значенням опору ізоляції, і діапазонів напруг значно більша кількість, ніж у першому каналі. Після аналізу графіка залежності напруги на ніжці контролера від опору ізоляції мережі (рис 2.1) стає зрозуміло, що залежність складна і нелінійна, що робить використання єдиної аналітичної формули для обробки даних малоефективним через значну похибку. Для оптимального вирішення цієї проблеми було застосовано метод сегментної апроксимації, який передбачає поділ графіка на декілька лінійних ділянок.

На основі отриманих експериментальних даних та аналізу таблиці залежності напруги від опору було визначено, що графік доцільно розбити на 7 лінійних ділянок. Кожна ділянка відповідає певному інтервалу значень напруги на ніжці

мікроконтролера, отриманих після перетворення аналогового сигналу на цифровий за допомогою АЦП. Межі кожної лінійної ділянки обиралися таким чином, щоб мінімізувати похибку апроксимації в межах цього інтервалу. Для цього використовувалися контрольні точки, отримані з експериментальних даних, що максимально точно відображають поведінку системи в різних діапазонах опору ізоляції.

Для кожного з цих інтервалів було складено лінійне рівняння у вигляді:

$$R_i = k_i \times U_{ADC} + b_i, \quad (2.3)$$

де R_i — обчислений опір ізоляції для i -го інтервалу;

U_{ADC} — значення напруги, отримане з АЦП (в цифрових одиницях);

k_i — коефіцієнт нахилу лінії для i -го інтервалу;

b_i — коефіцієнт зміщення для i -го інтервалу.

Коефіцієнти k_i та b_i підбиралися для кожного інтервалу експериментально.

Отже, програма працює за таким алгоритмом: після отримання даних з аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) виконується аналіз для визначення, в якому проміжку напруги знаходиться виміряне значення. На основі визначеного проміжку та поточного режиму роботи апарату (режим реле витоку чи режим блокування реле витоку) програма обирає відповідну для цього проміжку формулу. Потім, за допомогою цієї формули, обчислюється поточне значення опору ізоляції мережі. Такий підхід забезпечує точність та адаптивність розрахунків у різних режимах роботи системи.

Після завершення збору даних з усіх восьми каналів входу програма виконує їх обробку та готує до передачі через протокол Modbus RTU у шахтну мережу. Усі значення з цифрових входів зчитуються та безпосередньо перетворюються в біти, які відповідають конкретному стану реле, наявності високої напруги, вибраної уставки та інших параметрів. Аналогові дані після розрахунків, наприклад рівень

напруги або значення опору ізоляції, записуються у числовому вигляді в спеціальні реєстри пам'яті для подальшої передачі. Організація даних у реєстрах здійснюється відповідно до прийнятого стандарту шахтної мережі, забезпечуючи чітке дотримання порядку параметрів. У сформованому кадрі даних передаються такі параметри, як стан реле (у вигляді бітів), поточне значення опору ізоляції, рівень напруги та інші показники, кожен із яких записується у заздалегідь визначену позицію реєстрів. Додатково до кадру додається адреса пристрою, код функції для читання реєстрів та контрольна сума (CRC16) для перевірки цілісності даних. Готовий кадр передається через апаратний модуль USART, який реалізує взаємодію з шахтною мережею за допомогою інтерфейсу RS-485, забезпечуючи надійний зв'язок і відповідність специфікаціям системи.

Таким чином, програма не лише виконує вимірювання та обчислення параметрів, але й забезпечує їх коректне кодування та передачу відповідно до стандартів шахтної мережі.

2.5 Розробка принципової електричної схеми плати: вибір компонентів та аналіз вузлів

Проектування принципової електричної схеми є ключовим етапом у розробці апаратної частини плати. Ця схема відображає взаємозв'язок усіх елементів, визначає архітектуру пристрою та забезпечує його відповідність функціональним і технічним вимогам. Для плати, інтегрованої в апарат АЗУР.4ПП, основними завданнями є забезпечення високої точності зчитування даних, стабільність роботи в шахтному середовищі та підтримка комунікаційного інтерфейсу для обміну інформацією з мережею.

Особливістю розробки є необхідність врахування жорстких вимог до іскробезпеки, енергоефективності та стійкості до електромагнітних завад. Вибір кожного компонента, конфігурація вузлів і загальна структура схеми повинні

забезпечити не лише функціональність плати, але й відповідність усім стандартам безпеки для експлуатації у вибухонебезпечному середовищі.

На основі проведеного аналізу, описаного в попередніх розділах, розроблено загальну принципову схему плати (рис 2.3). При побудові схеми враховано:

- а) призначення ніжок мікроконтролера відповідно до їх функціонального використання (аналого-цифрові входи, цифрові входи/виходи, шини комунікації);
- б) забезпечення стабільного живлення для всіх компонентів плати, включаючи перетворення напруги з вихідної точки апарата;
- в) реалізацію ізоляції сигналів через оптрони для захисту мікроконтролера від високовольтних впливів;
- г) підключення комунікаційного інтерфейсу USART для передачі даних через RS-485.

Для реалізації функції передачі даних було використано мікросхему SP485, яка забезпечує інтерфейс RS-485 для зв'язку плати з шахтною мережею. Для живлення цієї мікросхеми з гальванічною розв'язкою було обрано мікросхему MC33063A, яка виконує функцію перетворювача постійної напруги. Її обв'язка виконана відповідно до рекомендацій технічної документації (даташита). Вхідна напруга для цього перетворювача подається з окремої обмотки трансформатора, що забезпечує 10 В змінної напруги. Такий підхід забезпечує надійність роботи та захист від впливу високовольтних перешкод.

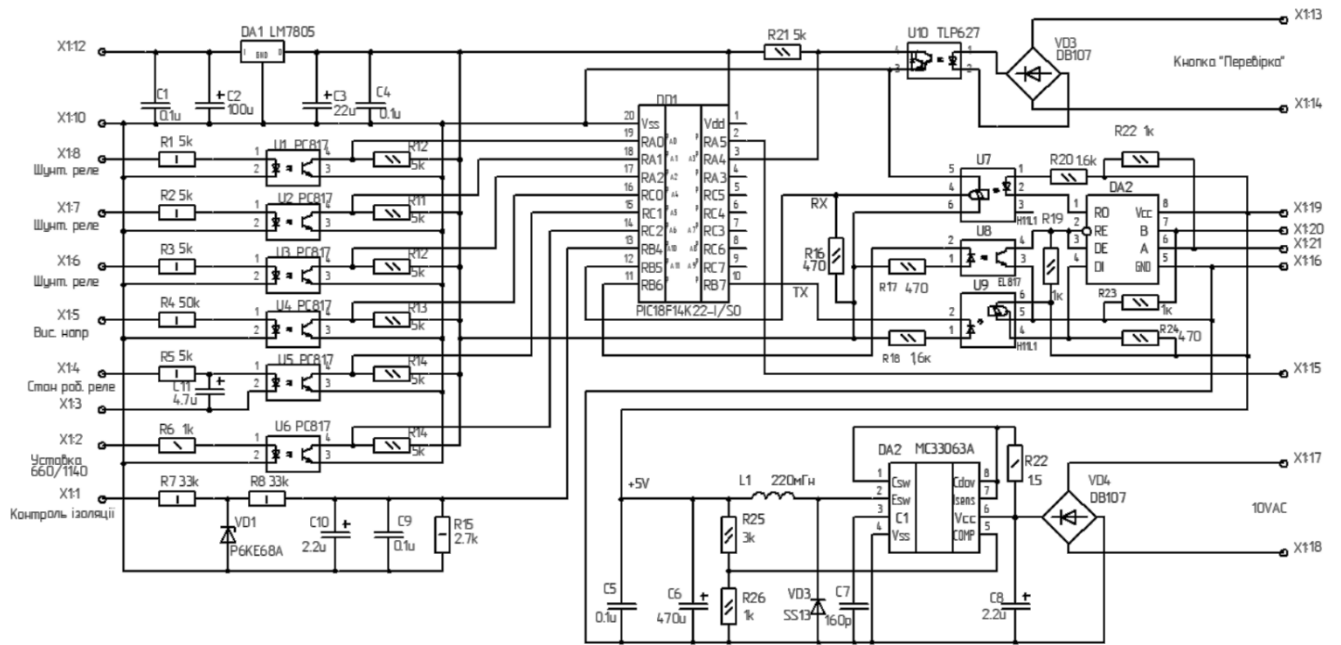


Рисунок 2.3 – Загальна принципова електрична схема цифрової плати керування апаратом АЗУР.4ПП

У схемі чітко розмежовано функціональні вузли: система живлення, канали зчитування аналогових і цифрових сигналів, блок обробки сигналів на базі мікроконтролера та модуль передачі даних. Це забезпечує структурованість схеми та спрощує діагностику в разі потреби.

3 ТЕСТУВАННЯ РОБОЧОГО ПРОТОТИПУ В УМОВАХ ПРИБЛИЖЕНИХ ДО РОБОЧИХ

3.1 Робочий прототип

На основі розробленої принципової електричної схеми було виготовлено друковану плату (рис. 3.1), методом фрезерування на верстаті ЧПУ на аркуші склотекстоліту. Отримана плата стала основою для створення робочого прототипу (рис. 3.2). Виготовлена плата містить усі компоненти, передбачені схемою, з урахуванням розташування контактів, забезпечення гальванічної розв'язки, стабільного живлення та точності вимірювань. Зв'язок між розробленою платою та апаратом АЗУР.4ПП реалізований через роз'єм РШ2Н-2-16, що забезпечує надійне підключення і відповідає вимогам промислових стандартів.

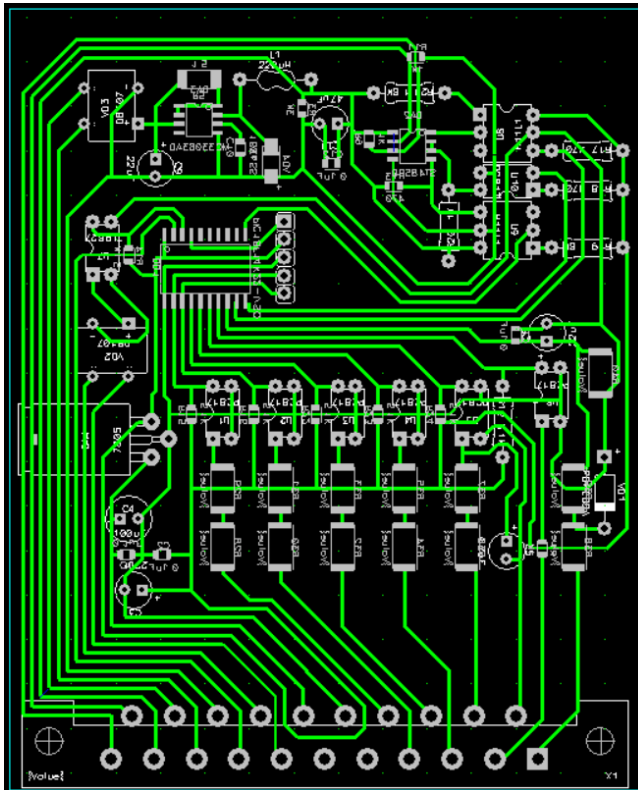


Рисунок 3.1 – Розроблена цифрова плата керування апарату АЗУР.4ПП

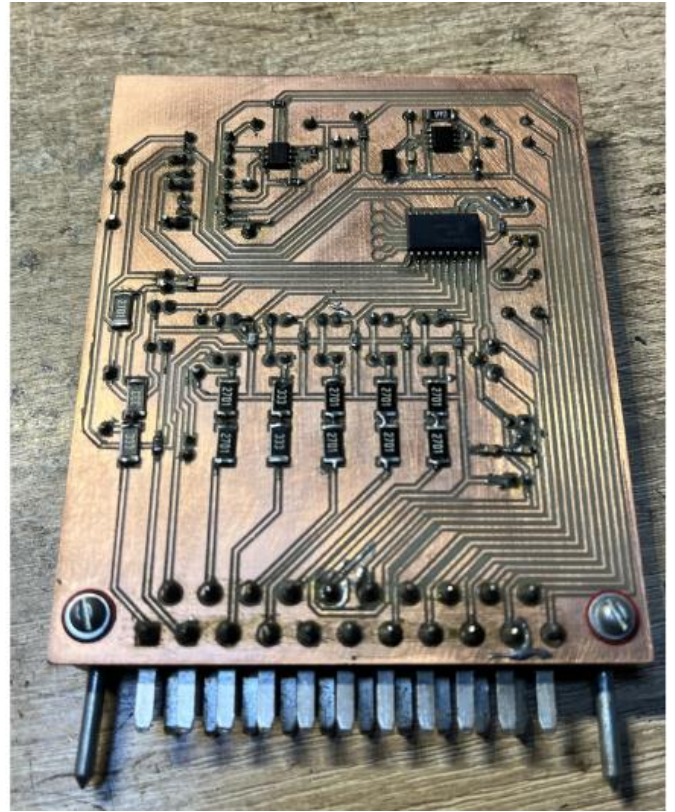


Рисунок 3.2 – Виготовлений робочий прототип

Далі прототип було підключено до апарату згідно схеми, після чого проведено комплексні випробування в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації. Основна мета тестування полягала у перевірці функціональності плати, її відповідності розробленим алгоритмам та здатності працювати у складних умовах шахтного середовища з підвищеними вимогами до надійності та безпеки.

3.2 Вимірювальне обладнання та випробування

Випробування робочого прототипу проводилися на стенді для перевірки та налаштування апаратів захисту типу АЗУР (рис 3.3).



Рисунок 3.3 – Стенд для перевірки та налаштування апаратів захисту типу АЗУР

Стенд виконаний у вигляді стаціонарного пристрою, що дозволяє проводити перевірку вказаних апаратів за умов спеціалізованого ремонтного підприємства.

Стенд дозволяє здійснювати такі види перевірок та випробувань:

- а) перевірку величини опору спрацьовування при однофазному витоку;
- б) перевірку величини тривалого струму витоку;
- в) перевірку величини опору спрацьовування при симетричному трифазному витоку;
- г) перевірку величини короткочасного струму витоку;
- д) перевірку власного часу спрацьовування апарата захисту;
- е) перевірку величини опору спрацьовування в режимі блокування реле витоку (БРУ);
- є) перевірку на спрацьовування від кнопки «Перевірка».

Конструктивно стенд виконаний у вигляді модуля, що містить пристрої живлення, комутації (вибору режиму роботи), сигналізації та підключення зовнішніх пристроїв. Вимірювання та фіксація параметрів при випробуваннях

апаратів захисту проводиться вимірювальними та реєструючими приладами, що підключаються до стенду.

Принцип роботи стенду ґрунтується на імітації параметрів та режимів роботи реальної трифазної мережі, з можливістю зміни її параметрів до граничних значень:

- а) ємність мережі змінюється поступово від 0 до 1 мкФ на фазу;
- б) опір ізоляції мережі (симетричне зниження та однофазний витік) регулюється в межах можливих значень;
- в) імітується режим комутації окремих відгалужень мережі шляхом увімкнення відключення ступенів конденсаторів макета мережі.

Тестування проводилися у кілька етапів, щоб перевірити його функціональність, відповідність розробленим алгоритмам та здатність працювати в умовах реального експлуатаційного середовища. Загалом результати тестувань підтвердили працездатність плати та виконання нею основних функцій, однак було виявлено аспекти, які потребують подальшого вдосконалення.

Цифрові входи прототипу, призначені для контролю стану реле, кнопки «Перевірка» та уставок напруги, працювали стабільно та без збоїв. Точність визначення стану забезпечувалася надійністю контактів та коректною обробкою сигналів в мікроконтролері. Цифрові виходи для передачі інформації через протокол Modbus RTU також функціонували відповідно до очікувань. Передача даних до шахтної мережі здійснювалася без втрат, що свідчить про коректну роботу мікросхеми SP485 і її обв'язки.

Для перевірки аналогових каналів, що відповідають за контроль рівня напруги та опору ізоляції, проводилися тести з різними вхідними параметрами. Результати вимірювань рівня напруги підтвердили правильність роботи каналу та відповідність показників прогнозованим значенням.

Водночас, при тестуванні каналу контролю опору ізоляції були зафіксовані відхилення між розрахунковими та реальними значеннями опору. Зокрема, для діапазону низьких значень опору ізоляції (до 5 кОм) точність вимірювань потребує

покращення. Це може бути пов'язано як із впливом зовнішніх перешкод, так і з недоліками у виборі коефіцієнтів апроксимації для формул обчислення опору.

Система живлення прототипу, реалізована за допомогою мікросхеми MC33063A, забезпечувала стабільну напругу для роботи плати та периферії. Перевірка ізоляції живлення для мікросхеми SP485 підтвердила її відповідність вимогам іскробезпеки. Живлення всієї плати залишалося стабільним навіть за умов підвищених навантажень.

На основі отриманих результатів тестування було визначено, що:

- а) загальна робота прототипу відповідає поставленим вимогам, але для досягнення більшої точності необхідно вдосконалити алгоритми контролю опору ізоляції. Зокрема, слід доопрацювати розрахункові формули та розглянути можливість використання більш точного АЦП;
- б) варто провести додаткові випробування плати для подальших тестів в умовах шахтного середовища для оцінки впливу перешкод і стабільності роботи аналогових каналів;
- в) варто більш детально перевірити систему гальванічної розв'язки, особливо в умовах сильних електромагнітних завад.

ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломної роботи було вирішено комплекс завдань, пов'язаних із розробкою, аналізом, конструюванням і тестуванням електронної плати, призначеної для інтеграції в апарат АЗУР.4ПП. Основною метою роботи було створення надійного пристрою для збору, обробки та передачі даних про основні параметри електромережі в умовах шахтного середовища, де високі вимоги до безпеки й надійності є критично важливими.

На етапі аналізу та проектування було детально досліджено електричну схему апарату АЗУР.4ПП для визначення оптимальних точок зняття даних. У результаті обрано ключові контрольні точки, які забезпечують точне відстеження параметрів напруги, струму та опору ізоляції. Особливу увагу приділено мінімізації впливу електромагнітних перешкод і забезпеченню іскробезпеки, що є критичним для експлуатації у вибухонебезпечних середовищах.

Важливим етапом стало створення алгоритмів обробки сигналів. Для цифрових входів було реалізовано логічний аналіз, а для аналогових сигналів — програмна обробка із використанням 10-розрядного аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Зокрема, для каналу контролю рівня напруги мережі та опору ізоляції було проведено апроксимацію залежностей, які дозволили розбити нелінійні характеристики на ділянки з лінійними формулами. Такий підхід забезпечив високу точність обчислень при мінімальних затратах на обчислювальні ресурси мікроконтролера.

Для реалізації функцій плати було обрано мікроконтролер PIC18F14K22, який відповідає всім технічним вимогам завдяки достатній кількості цифрових і аналогових входів, а також вбудованій підтримці апаратного протоколу USART для передачі даних. Завдяки використанню мікросхеми SP485 з гальванічно розв'язаним живленням (реалізованим за допомогою мікросхеми MC33063A) було

забезпечено надійну передачу інформації в шахтній мережі за протоколом Modbus RTU.

На етапі створення принципової електричної схеми було враховано всі особливості компонування плати, відповідність компонентів технічним вимогам та специфіку взаємодії з іншими вузлами апарату. Було обрано якісні електронні компоненти, зокрема оптрони для гальванічної розв'язки, струмообмежуючі резистори, дільники напруги та фільтри, що забезпечують стабільну роботу плати навіть в умовах високих перешкод.

На завершальному етапі проведено тестування та верифікацію роботи плати на спеціалізованому стенді для перевірки апаратів захисту типу АЗУР. Практичні експерименти підтвердили працездатність плати. Дані з усіх восьми каналів входу передаються з високою точністю та стабільністю. Усі параметри, необхідні для моніторингу та управління роботою апарату, успішно зчитуються, та обробляються.

Виготовлений прототип продемонстрував свою функціональність та здатність виконувати основні завдання, однак для забезпечення високої точності та надійності, особливо в аспекті контролю ізоляції, необхідно провести подальші доопрацювання. Удосконалення прототипу та додаткові тестування сприятимуть покращенню його експлуатаційних характеристик та готовності до подальших тестувань безпосередньо в шахтних умовах.

Таким чином, мета дипломної роботи досягнута. Розроблена плата, за умови подальших тестувань та доопрацювань, може забезпечити вирішення низки технічних завдань, які можуть бути використані для подальшого вдосконалення пристроїв цього класу.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Jones, M. H. A Practical Introduction to Electronic Circuits. United Kingdom: Cambridge University Press. 1995. 522p.
2. Глухов О. В., Кравчук О. О., Левченко Є. В. Вивчення властивостей мікроконтролерів і електронних систем на базі платформи Ардуіно: навч. посібник. Харків: ХНУРЕ. 2019.
3. Бондаренко І. М., Глухов О. В., Кравчук О. О. Електронні системи: навч. посіб. для студентів спец. "Електроніка". Харків: ХНУРЕ. 2019
4. Jeremy Blum. Exploring Arduino: Tools and Techniques for Engineering Wizardry. John Wiley and Sons Ltd. 2019. 512p.
5. Бобринська А. В., Шевченко А. Ю., Свідерська Л. І. Сучасні програмні засоби проектування друкованих плат радіотехнічних систем та СВЧ-пристроїв. 2021. <https://openarchive.nure.ua/handle/document/18524>
6. Paul Horowitz, Winfield Hill. The art of electronics. Cambridge University Press. 2009. 1192p.
7. Платт Чарльз. Електроніка для початківців. Кембрідж. 2012. 480с.
8. Бітченко О. М. Електроніка і мікросхемотехніка. Мікропроцесори і мікроконтролери: підруч. / О. М. Бітченко, О. І. Цопа. Харків: Фінарт, 2015. 434с.
9. Лисенков М. О. Мікроконтролери в приладах і пристроях : підруч. для студ. техн. спец. вищ. навч. закл. / М. О. Лисенков, І. І. Ключник. Харків : ХНУРЕ, 2014. 368 с.
10. Брей, Б. Застосування мікроконтролерів PIC18. Архітектура, програмування та побудова інтерфейсів з використанням C і асемблера. 2015. 576с.
11. Кеніг, А. М. Повне керівництво з мікроконтролерів PIC. 2007. 255с.
12. Заєць, Н. І. Радіотехнічні конструкції на мікроконтролерах PIC. Солон-прес. 2005. 240с.

13. Хелібайк, Ч. Програмування мікроконтролерів PIC на PicBasic. Додека XXI. 2017. 328с.
14. Катцен, С. PIC - мікроконтролери. Усе, що вам необхідно знати. Додека XXI. 2010. 651с.
15. Магда, Ю. С. Мікроконтролери PIC24: архітектура та програмування. Додека XXI. 2010. 240с.
16. Білецький В. С. Мала гірнича енциклопедія. Донецьк: Східний видавничий дім. 2013. 640с.