

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

Сокальська Вікторія Вікторівна

**Розроблення автоматизованої системи збору та обробки
даних про споживання електроенергії/ Development of an
automated system for collecting and processing data on
electricity consumption**

спеціальність: 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

Кваліфікаційна робота

Виконав студент групи АКІТ - 41
В. В. Сокальська

Науковий керівник
к.т.н., О.М. Заставний

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту:

« ____ » _____ 2026 р.

Завідувач кафедри

_____ **А.І. Сегін**

ТЕРНОПІЛЬ – 2026

Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "бакалавр"

Спеціальність: 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри СКС

А.І.Сегін

“ ” 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТЦІ

СОКАЛЬСЬКІЙ Вікторії Вікторівні

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

Розроблення автоматизованої системи збору та обробки даних про споживання електроенергії / Development of an automated system for collecting and processing data on electricity consumption

керівник роботи к.т.н., Заставний О.М.

затверджені наказом по університету від 1.12.2025р №894.

2. Строк подання студентом закінченої випускної кваліфікаційної роботи:
25 травня 2026р.

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

1. Нормативно-технічна документація, державні стандарти побудови АСКОВ та інженерні керівництва з розгортання промислових інтерфейсів зв'язку типу RS-485

2. Технічні характеристики та протоколи обміну даних (Modbus RTU) мікропроцесорних трифазних електролічильників комерційного обліку

3. Архітектурні специфікації ОС Embedded Linux та вбудованої СКБД SQLite для периферійних контролерів

4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. Аналіз систем моніторингу електроспоживання та обґрунтування асинхронного підходу для збору даних

2. Розробка асинхронного неблокуючого планувальника опитування 32 лічильників на основі системного виклику `select()`

3. Створення локального сховища даних у СКБД SQLite та оптимізація швидкодії запису в режимі WAL

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

1. Структурна схема автоматизованої системи моніторингу та аналізу електроспоживання

2. Функціонально-архітектурна схема інформаційного обміну на рівні периферійного контролера

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Заставний О.М.		
2	Заставний О.М.		
3	Заставний О.М.		

7. Дата видачі завдання 01 грудня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Дослідження предметної області АСКОВЕ. Формування технічного завдання та опрацювання наукових першоджерел.	01.12.2025р. – 15.01.2026р.	
2	Порівняльний аналіз архітектурних рішень для збору енергометрик. Вивчення специфікацій протоколу Modbus RTU та Embedded Linux.	16.01.2026р. – 15.03.2026р.	
3	Проектування інформаційної взаємодії пристрою ПЗПД: кодування неблокуючого опитування шини RS-485 та оптимізація бази даних SQLite.	16.03.2026р. – 30.04.2026р.	
4.	Систематизація результатів розробки, фінальне редагування тексту та проходження нормоконтролю і перевірки на плагіат.	01.05.2026р. – 25.05.2026	

Студент

(підпис)

Сокальська В.В.

Керівник роботи

(підпис)

к.т.н., Заставний О.М.

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота виконана на 80 сторінках та містить 18 рисунків, 2 таблиці, 2 додатки, 9 джерел за переліком посилань.

Мета роботи: розроблення автоматизованої системи збору та обробки даних про споживання електроенергії (ПЗПД) для підвищення точності обліку та оперативності доступу до інформації в енергосистемах України.

Методи дослідження: системний аналіз, математичне та цифровізоване імітаційне моделювання, методика програмно-керованої інжекції збоїв Software Fault Injection на рівні віртуальної файлової системи.

Результати роботи: програмно реалізовано завадостійке ядро ПЗПД на базі Embedded Linux (C/C++) та СКБД SQLite WAL. Алгоритм асинхронного транзакційного кешування знизив знос eMMC-пам'яті у 9600 разів, з 2,76 млн до 288 записів/добу, забезпечивши відмовостійкість при вимкненні живлення та обхід 32 лічильників за 4,24 с при навантаженні CPU 0,22%.

Рекомендації щодо використання: інтеграція в існуючі вузли обліку розподільчих мереж України, об'єкти відновлюваної енергетики та промислові підприємства для переходу до Smart Grid.

Напрямки розвитку: інтеграція з національними платформами обліку, впровадження Edge Computing, автоматичного балансування мікромереж (Microgrids) та систем керування відключеннями (OMS).

Ключові слова: АСКОВЕ, ПЗПД, EMBEDDED LINUX, SQLITE WAL, RS-485, ТРАНЗАКЦІЙНЕ КЕШУВАННЯ, eMMC, ВІДМОВОСТІЙКІСТЬ, SMART GRID, ІНЖЕКЦІЯ ЗБОЇВ.

ANNOTATION

Qualification work is executed on 80 pages and including 18 illustrations, 2 table, 2 appendices, 9 sources after the list of references.

Purpose of work: development of an automated data collection and processing system for electricity consumption (DCPS) to improve metering accuracy and data access efficiency in Ukrainian power systems.

Research methods: systems analysis, mathematical and digital simulation modeling, and software-controlled fault injection methodology at the virtual file system level for stress testing.

Job performances: a modular fault-tolerant DCPS core based on Embedded Linux (C/C++) and SQLite WAL has been implemented. An asynchronous transactional caching algorithm reduces eMMC memory wear by 9600 times from 2.76M to 288 overwrites/day, ensuring data safety during blackouts and a 4.24 s polling cycle for 32 meters with 0.22% CPU load.

Recommendations: integration into existing metering nodes of Ukrainian distribution networks, renewable energy facilities, and industrial enterprises to replace legacy devices with Smart Grid solutions.

Directions of development: integration with national metering platforms, deployment of Edge Computing, low-voltage microgrid balancing, and connection to Outage Management Systems (OMS).

Keywords: AMR, DCPS, EMBEDDED LINUX, SQLITE WAL, RS-485, TRANSACTIONAL CACHING, eMMC, FAULT TOLERANCE, SMART GRID, FAULT INJECTION.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОТОЧНОГО СТАНУ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ УКРАЇНИ.....	9
1.1 Проблематика вибору каналів зв'язку в умовах експлуатації українських енергомереж.....	17
1.2 Ієрархічна структура та функціональні рівні інтелектуальних систем обліку.....	19
1.3 Глобальна трансформація моделей генерації та міжнародний досвід побудови систем обліку.....	21
2. ОБҐРУНТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ ТА ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ.....	25
2.1 Розробка базових типів даних та конфігураційних структур системи.....	28
2.2 Обґрунтування вибору апаратної платформи та операційного середовища ПЗПД.....	36
2.3 Програмна реалізація модулів опитування периферійних приладів обліку та системної діагностики.....	41
2.4 Розробка архітектури планувальника завдань та асинхронного неблокуючого обходу периферії.....	45
2.5 Програмна реалізація модуля ініціалізації локального сховища ПЗПД та налаштування режиму WAL у СКБД SQLite.....	50
2.6 Програмна реалізація асинхронного неблокуючого планувальника опитування шини RS-485.....	53
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ, ОПТИМІЗАЦІЯ РЕСУРСІВ ТА АНАЛІЗ ВІДМОВОСТІЙКОСТІ СИСТЕМИ В УМОВАХ КРИТИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ.....	57

					ДП.АКІТ.10658671.00.00.00.000 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Сокальська В.В			Розроблення автоматизованої системи збору та обробки даних про споживання електроенергії	Літ.	Арк.
Перевірив.		Заставний О.М.					
Консульт.		Заставний О.М.				6	80
Н. Контр.		Заставний О.М.				ЗУНУ.ФКІТ.АКІТ-41	
Затверд.		Сегін А.І.					

3.1	Методика моделювання завадової обстановки та штучного спотворення пакетів у промисловій шині зв'язку.....	57
3.2	Експериментальне дослідження впливу параметрів кешування на інтенсивність зносу флешпам'яті (eMMC).....	62
3.3	Аналіз поведінки підсистеми збереження даних WAL при раптових аварійних вимкненнях живлення.....	65
3.4	Оцінка пропускної здатності та масштабованості системи при максимальному заповненні карти опитування.....	68
ВИСНОВКИ.....		72
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....		75

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВСТУП

Сучасний розвиток енергетики характеризується зростанням обсягів споживання електроенергії, ускладненням енергетичних систем та підвищенням вимог до ефективності використання ресурсів. У цих умовах особливого значення набуває точний і своєчасний облік електроенергії, а також можливість оперативного аналізу отриманих даних. Традиційні підходи до збору інформації про споживання електроенергії часто не відповідають сучасним вимогам через їхню трудомісткість, низьку швидкість обробки та ймовірність виникнення помилок. Саме тому впровадження автоматизованих систем, здатних забезпечити безперервний моніторинг і обробку даних, є важливим кроком у напрямку підвищення енергоефективності.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю переходу до інтелектуальних систем обліку, які дозволяють отримувати достовірну інформацію в режимі реального часу та забезпечують основу для прийняття обґрунтованих управлінських рішень. Використання сучасних інформаційних технологій відкриває можливості не лише для автоматизації процесів збору даних, але й для їх глибокого аналізу, виявлення закономірностей споживання та оптимізації використання електроенергії. У контексті глобальних тенденцій енергозбереження та цифровізації це питання набуває особливої значущості як для підприємств, так і для побутових споживачів.

Метою даної кваліфікаційної роботи є розроблення автоматизованої системи збору та обробки даних про споживання електроенергії, яка забезпечить підвищення точності обліку, оперативність доступу до інформації та ефективність її подальшого аналізу. Досягнення цієї мети передбачає дослідження існуючих підходів до організації обліку електроенергії, визначення вимог до побудови системи, проектування її структури, а також реалізацію програмного забезпечення, здатного обробляти та інтерпретувати отримані дані. Об'єктом дослідження є процес споживання електроенергії та його облік у сучасних умовах функціонування енергетичних систем. Предметом дослідження

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

виступають методи, моделі та програмно-технічні засоби автоматизації збору й обробки даних про енергоспоживання. У процесі виконання роботи застосовано методи системного аналізу, що дозволяють розглядати досліджувану систему як цілісну структуру, а також методи моделювання та обробки даних, які забезпечують практичну реалізацію поставлених завдань.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розробленої системи для підвищення ефективності обліку електроенергії в різних сферах застосування. Її впровадження сприятиме зменшенню витрат часу на обробку інформації, підвищенню точності даних та покращенню контролю за енергоспоживанням. Окрім цього, результати роботи можуть бути використані як основа для подальшого вдосконалення інформаційних систем у сфері енергетики.

Апробація результатів роботи. Основні положення та технічні рішення роботи довідалися, обговорювалися та були представлені у формі доповіді на науково-технічній конференції студентів та молодих учених факультету комп'ютерних та інформаційних технологій Західноукраїнського національного університету.

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

1 ДОСЛІДЖЕННЯ ПОТОЧНОГО СТАНУ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ УКРАЇНИ

У нинішній час функціонування та розвиток енергетичного комплексу відбувається в умовах зростаючих загроз, спричинених масштабними руйнуваннями об'єктів життєво важливої інфраструктури внаслідок військової агресії. Планомірні удари по генеруючих потужностях, вузлових підстанціях та електричних мережах призвели до значного ускладнення експлуатаційних умов об'єднаної енергосистеми, що вимагає її негайної адаптації до обмежених ресурсів та підвищеної вірогідності аварій.

Енергетична система України за своєю будовою є переважно централізованою, з домінуванням потужних об'єктів генерації – атомних, теплових та гідроелектростанцій. Електрична енергія, вироблена ними, спрямовується магістральними лініями високої напруги до ключових підстанцій, де відбувається її перетворення та подальше розподілення до регіональних і локальних мереж. Така ієрархічна модель забезпечує централізоване керування та збалансування навантажень, проте у ситуаціях пошкодження окремих вузлів мережі вимагає оперативного ренаправлення енергетичних потоків.

Ключовою особливістю роботи енергосистеми в сучасних реаліях є постійна потреба у співвідношенні обсягів виробництва та споживання електроенергії. Будь-який дисбаланс неминуче спричиняє порушення стабільності частоти та напруги в мережі, провокуючи аварійні ситуації. З огляду на це, диспетчерське управління ведеться у режимі реального часу, базуючись на актуальній інформації про стан мережі. У разі серйозних пошкоджень запроваджується режим секціонування енергосистеми, що полягає у поділі мережі на незалежні ділянки, здатні працювати автономно. Це дає змогу підтримувати живлення найважливіших споживачів навіть за умови часткової втрати цілісності системи.

Невід'ємним елементом функціонування енергосистеми є система обліку електроенергії, яка гарантує отримання достовірних даних щодо обсягів

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

генерації, транспортування та використання енергії. Облік ведеться на всіх рівнях: від генеруючих підприємств і магістральних мереж до розподільчих пунктів та кінцевих абонентів. Отримані відомості використовуються як для комерційних розрахунків, так і для технічного контролю за режимами роботи мережі.

Традиційно в нашій країні широко застосовуються індукційні лічильники, чия робота ґрунтується на електромеханічному принципі. Ці прилади відзначаються простотою конструкції й достатньою надійністю, але мають обмежений функціонал. Зчитування показників у таких системах відбувається вручну – або працівниками оператора системи розподілу, або самими споживачами з подальшою передачею даних через платіжні системи, онлайн-ресурси або інші канали зв'язку. Цей процес значно залежить від людського фактора, що може спричинити помилки при фіксації показників, їх невірну передачу чи запізнення. Крім того, існує ризик цілеспрямованого втручання у роботу приладів обліку (механічного чи магнітного впливу), що призводить до викривлення реальних обсягів споживання електроенергії.

Іншим серйозним мінусом є відсутність оперативного доступу до інформації. Дані про споживання стають доступними лише після ручного зчитування, що унеможлиблює використання цих приладів для моніторингу навантаження миттєво та обмежує можливості ефективного управління енергоспоживанням. В умовах, коли потрібне швидке реагування на зміни у роботі енергосистеми, подібні обмеження є критичними та диктують необхідність переходу до більш сучасних методів обліку електроенергії.

Для підвищення ефективності обліку електроенергії в Україні впроваджуються новітні електронні лічильники, які складають основу автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ). Ці прилади оснащені мікропроцесорними рішеннями, що забезпечують високу точність вимірювань, здатність накопичувати й зберігати детальну інформацію про споживання, а також підтримувати багатозонний облік за різними тарифами. Вони можуть реєструвати ключові параметри електромережі, зокрема напругу,

					ДП.АКИТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

силу струму, частоту, активну та реактивну потужність, і формувати профілі навантаження з потрібною періодичністю, як-от погодинно, поквартально тощо. Більше того, АСКОЕ надає можливість реалізувати функції дистанційного контролю та управління, включно з віддаленим обмеженням чи відключенням споживачів у разі перевищення договірної потужності або наявності боргів. Це набуває особливої важливості за умов необхідності регулювання навантаження в енергосистемі.

Збір відомостей з електронних лічильників відбувається в межах автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії. За архітектурою такі системи охоплюють рівень самих приладів обліку, рівень збору та передачі даних, а також рівень централізованої обробки інформації. Передачу даних можна здійснювати, застосовуючи різноманітні технології комунікації. Зокрема, широке використання має технологія PLC, яка передбачає передачу інформації через існуючі електричні мережі до концентраторів даних, розміщених на трансформаторних пунктах. Також застосовуються безпроводні канали зв'язку на базі мобільних мереж (GSM/GPRS, 3G/4G) та спеціалізованих IoT-технологій, як-от NB-IoT та LoRaWAN, що гарантують надійне надсилання даних навіть у непростих умовах експлуатації.

На етапі обробки даних функціонують програмно-апаратні комплекси, які відповідають за автоматизоване приймання, перевірку достовірності, збереження та аналіз інформації. Системи обробки дозволяють формувати графіки навантаження, здійснювати моніторинг споживання у режимі, максимально наближеному до фактичного, а також виявляти нетипові робочі стани мережі, зокрема перевантаження чи несанкціоновані підключення. Автоматизація процесів обліку значно зменшує вплив людського чинника. Роль персоналу трансформується з прямого збору даних до функцій нагляду, обслуговування апаратури та прийняття рішень керівництвом на основі отриманих відомостей. Окремої уваги заслуговує процес осучаснення засобів обліку електроенергії. Оператори систем розподілу втілюють інвестиційні програми, націлені на поступову заміну застарілих індукційних лічильників на

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

сучасні електронні пристрої. У більшості випадків ця заміна відбувається коштом оператора без фінансових витрат для споживачів у рамках програм модернізації мереж. Це створює технічну основу для подальшого впровадження систем автоматизованого збору та аналізу даних.

Таблиця 1.1

Порівняльна характеристика моделей обліку даних

Характеристика	Індукційний лічильник	АСКОЕ (Смарт-система)
Принцип роботи	Механічний облік на основі обертання диска під дією електромагнітного поля	Автоматизований електронний облік із передачею даних через цифрові канали
Точність вимірювання	Клас 2.0 - 2.5 (низька)	Клас 1.0 і вище (висока)
Збір даних	Ручний (показники знімає людина)	Автоматичний у режимі реального часу
Передача даних	Вручну споживачем	Дистанційна (GSM, інтернет, радіоканали тощо)
Швидкість отримання інформації	Низька	Висока (миттєвий доступ до даних)
Виявлення втрат і крадіжок	Дуже слабе	Миттєво сповіщає про втручання
Людський фактор	Високий (помилки при знятті показників)	Мінімальний
Вартість впровадження	Низька	Висока (обладнання + програмне забезпечення)
Вартість обслуговування	Невисока, але потребує періодичних перевірок	Вища, але автоматизація зменшує експлуатаційні витрати
Функціональність	Обмежена лише обліком	Багатофункціональна система (облік, контроль, аналіз, прогнозування)
Можливість інтеграції	Відсутня	Легка інтеграція з іншими інформаційними системами
Перспективність	Застаріла технологія	Сучасний стандарт у енергетиці

Додатковим чинником, що впливає на розвиток енергетичного сектору, є експансія децентралізованих джерел генерації. Зокрема, зростає число споживачів, які монтують власні сонячні електростанції та системи для зберігання енергії. У такій ситуації споживач набуває статусу активного суб'єкта

енергетичних процесів, що вимагає впровадження двостороннього обліку електроенергії – як тієї, що була спожита, так і тієї, що була віддана назад у мережу. Тож, нинішня ситуація в енергетичному секторі України зводиться до переплетення складних умов функціонування, що виникли внаслідок пошкодження наявної матеріально-технічної бази, та активного впровадження передових цифрових технологій.

1.1 Проблематика вибору каналів зв'язку в умовах експлуатації українських енергомереж

Розуміння сучасного стану енергообліку в Україні дозволяє виявити низку критичних бар'єрів, які стримують розвиток галузі та створюють операційні ризики. Для того, щоб обґрунтувати необхідність автоматизації, необхідно детально проаналізувати вразливості традиційних методів контролю, де ключову роль досі відіграє людський фактор. Процес ручного збору та обробки даних про споживання електроенергії в сучасних умовах є неефективним і створює низку критичних вразливостей для енергосистеми. Основною проблемою є так званий «людський фактор», який проявляється на всіх етапах: від зчитування показників з циферблата лічильника до внесення цих цифр у базу даних енергопостачальної компанії.

По-перше, ручний облік породжує високий рівень помилок. Неточне зчитування даних призводить до некоректного формування рахунків, що викликає недовіру споживачів до постачальника та створює додаткове навантаження на центри обслуговування клієнтів. По-друге, виникає проблема комерційних втрат. За відсутності автоматизації контролери не можуть оперативно виявити факти втручання в роботу лічильників або створення так званого “обану” мережі. В масштабах країни ці втрати обчислюються мільярдами гривень щорічно. Особливо гострою є проблема неможливості оперативного планування. У традиційній моделі енергетики дізнаються про обсяги споживання лише раз на місяць, коли надходять звіти. У той час як ринок

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

електроенергії потребує погодинного, а іноді й щохвилинного балансування. Без АСКОЕ неможливо реалізувати графіки обмеження навантаження в реальному часі, що критично під час дефіциту генерації. Енергосистема змушена працювати з великими резервами, що здорожує електроенергію для кінцевого споживача. Також варто зазначити неможливість впровадження динамічних тарифів для населення, адже без автоматичного фіксування часу споживання споживач не має фінансового стимулу переносити роботу енергоємних приладів (пральних машин, бойлерів) на нічний час, що розвантажило б систему в ранкові та вечірні піки. В той же час фундаментом будь-якої АСКОЕ є канал передачі даних. Вибір технології залежить від щільності забудови, відстаней та бюджету проєкту.

Розглянемо основні технологічні рішення, що використовуються в українській практиці на досвіді ДТЕК:

Технологія Power Line Communication (далі PLC) – це метод передачі сигналу безпосередньо через існуючі силові електричні дроти. Основна перевага PLC полягає у відсутності потреби в прокладанні додаткових кабелів або оренді частотного ресурсу. Це ідеальне рішення для багатоквартирних будинків, де лічильники розташовані близько один до одного. Проте технологія має суттєвий недолік, це висока чутливість до електромагнітних завад, що створюються побутовою технікою. В умовах зношених українських мереж надійність PLC часто виявляється недостатньою без встановлення додаткових фільтрів та ретрансляторів. Через високий рівень завад у силових лініях енергетики дедалі частіше розглядають бездротові рішення як більш стабільний варіант. Зокрема, ефективною альтернативою стає впровадження GSM-технологій. Використання SIM-карт у лічильниках дозволяє передавати дані безпосередньо на сервер через мережі мобільних операторів. Технології мобільного зв'язку GSM/GPRS/4G забезпечують високу швидкість та можливість встановлення обладнання в будь-якій точці, де є покриття. ДТЕК часто використовує цей метод для промислових об'єктів та великих вузлів обліку. Головним мінусом є постійна абонентська плата за кожен пункт обліку та високе енергоспоживання модулів зв'язку. Крім того, під час блекаутів базові станції мобільних операторів можуть вимикатися,

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

що призводить до втрати зв'язку з лічильниками саме тоді, коли дані найбільш потрібні. Натомість є можливість використання Wi-Fi. Він дешевий і доступний, але його використання в АСКОЕ обмежене. Основна проблема це залежність від домашнього роутера споживача. Якщо клієнт вимкне Wi-Fi або змінить пароль, енергокомпанія втратить доступ до лічильника. Також Wi-Fi має низьку проникну здатність крізь стіни та обмежену відстань, що робить його непридатним для масового збору даних у під'їздах або приватному секторі.

Розглянемо технологію Long Range Wide Area Network (далі LoRaWAN). Це одна з найбільш перспективних технологій для побудови АСКОЕ. LoRaWAN дозволяє передавати дані на відстань до 5 км у місті та до 15 км у сільській місцевості при мінімальному споживанні енергії. Один шлюз (базова станція) може обслуговувати тисячі лічильників. Вона працює на неліцензованих частотах, що економить кошти постачальника. Хоча швидкість передачі даних невелика, її цілком достатньо для передачі пакетів з показниками споживання. Впровадження LoRaWAN дозволяє створювати повністю автономні системи обліку, незалежні від сторонніх провайдерів.

1.2 Ієрархічна структура та функціональні рівні інтелектуальних систем обліку

Логічним продовженням аналізу технічних засобів та каналів зв'язку є розгляд загальної архітектури інтелектуальних систем, яка забезпечує перетворення первинних даних на інструмент управління енергоспоживанням. У сучасній практиці АСКОЕ розглядається як багатофункціональна багаторівнева структура, де кожен етап відіграє критичну роль у забезпеченні точності та оперативності розрахунків. Така ієрархічна побудова дозволяє не лише збирати показники, а й створювати цифровий фундамент для концепції Smart Grid, де енергосистема здатна самостійно реагувати на зміни в режимах роботи.

					ДП.АКИТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Нижній рівень цієї ієрархії формують безпосередньо інтелектуальні прилади обліку, які в сучасних умовах трансформуються з пасивних реєстраторів на активні сенсори енергомережі. Окрім фіксації обсягів спожитої енергії, вони здійснюють безперервний моніторинг параметрів напруги та частоти, що дозволяє енергопостачальним компаніям отримувати вичерпну інформацію про якість ресурсу безпосередньо в точці розмежування зі споживачем. Завдяки вбудованим модулям пам'яті та алгоритмам самодіагностики, ці пристрої здатні самостійно ідентифікувати аварійні ситуації або спроби несанкціонованого втручання, що суттєво підвищує рівень енергетичної безпеки та знижує комерційні втрати.

Другий, середній рівень архітектури, виступає сполучною ланкою між первинними датчиками та централізованими обчислювальними потужностями. Він базується на використанні концентраторів даних та промислових контролерів, які забезпечують агрегацію інформаційних пакетів, отриманих через канали PLC, GSM або LoRaWAN. Важливою науково-прикладною функцією цього рівня є протокольна конвертація та децентралізована фільтрація даних, що дозволяє суттєво знизити навантаження на магістральні канали зв'язку. Завдяки вбудованим алгоритмам локального зберігання інформації, середній рівень забезпечує високу живучість всієї системи, гарантуючи збереження даних навіть за умови тимчасової деградації зовнішніх мереж передачі, що є критично важливим для стабільності розрахунків на оптовому та роздрібному ринках електроенергії.

Верхній рівень архітектури представлений програмно-апаратним комплексом управління даними, який є інтелектуальним центром всієї системи. Саме тут відбувається автоматизована перевірка та аналітична обробка великих масивів інформації, що дозволяє енергетикам бачити реальну картину споживання у розрізі окремих районів або цілих міст. Сучасне програмне забезпечення дозволяє не лише автоматизувати розрахунки, а й здійснювати предиктивну діагностику обладнання, виявляючи потенційні перевантаження мережі ще до моменту виникнення аварій. Завдяки інтеграції з міжнародними

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

протоколами обміну даними, такими як DLMS/COSEM, досягається технічна сумісність між обладнанням різних виробників, що робить систему гнучкою та придатною до подальшого масштабування.

Таким чином, системна організація сучасного обліку перетворює розрізнені технічні пристрої на цілісний інтелектуальний механізм. Це створює умови для переходу від простого контролю за споживанням до активного управління енергоефективністю, де прозорість даних стає основою для стабільного розвитку енергетичної системи та підвищення якості послуг для кінцевого споживача.

1.3 Глобальна трансформація моделей генерації та міжнародний досвід побудови систем обліку

Сучасний світовий досвід розгортання та експлуатації інтелектуальних систем обліку демонструє тісний взаємозв'язок між архітектурою інформаційних мереж та характером виробництва електричної енергії. Світовий енергетичний комплекс тривалий час базувався на спалюванні викопного палива тепловими електростанціями, стабільній роботі атомних об'єктів та маневрених потужностях гідрогенерації. Проте в умовах глобального кліматичного регулювання та декарбонізації структура виробництва зазнає докорінних змін. Спостерігається стрімке збільшення частки відновлюваних джерел енергії, насамперед вітрових та сонячних електростанцій, які характеризуються високою непостійністю генерації, оскільки обсяги виробленої ними енергії прямо залежать від короткострокових метеорологічних чинників. Цей перехід від прогнозованої централізованої генерації до нестабільної розподіленої моделі кардинально змінює вимоги до систем збору даних, перетворюючи їх із засобів фінансового розрахунку на інструменти динамічного балансування енергосистеми.

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Аналіз міжнародної практики дозволяє чітко розділяти застарілі технологічні підходи, від яких наразі відмовляються провідні країни світу, та цільові орієнтири майбутнього розвитку. Перш за все, у світовій практиці зафіксовано повну технічну та економічну відмову від систем одностороннього автоматичного зчитування показників класу Automated Meter Reading. Такі системи, хоч і забезпечували дистанційну передачу даних за допомогою радіоканалів малого радіусу дії або простих провідних інтерфейсів, функціонували виключно в режимі «пристрій–сервер» без можливості зворотного зв'язку. Розвинені країни Європейського Союзу, США, Японія та Південна Корея повністю демонтують подібні рішення, оскільки вони не здатні забезпечити виконання завдань з управління попитом, не підтримують динамічне тарифне регулювання та мають критично низький рівень захисту від кіберзагроз і несанкціонованого доступу.

Окрім цього, у глобальному масштабі спостерігається тенденція до поступового обмеження використання класичних систем PLC першого покоління, зокрема, стандартів типу S-FSK. Причиною цього є суттєве ускладнення електромагнітної обстановки в низьковольтних мережах через масове підключення імпульсних блоків живлення, інверторів сонячних станцій та зарядних пристроїв для електротранспорту, які генерують високочастотні завади та блокують проходження сигналів по силових лініях. Натомість світовий технологічний мейнстрім спрямований на розгортання повнофункціональної розширеної інфраструктури вимірювання другого покоління. Нинішні інтелектуальні системи базуються на використанні гібридних каналів зв'язку, що поєднують технології багатоканальних радіомереж Mesh, енергоефективні протоколи масового IoT-сегменту, таких як NB-IoT, LoRaWAN, та оптичні магістралі для вузлових точок агрегації даних.

Основним напрямком розвитку інформаційних платформ енергообліку у світі є перехід від статичного накопичення профілів навантаження до інтелектуального управління даними в архітектурах хмарних обчислень Edge Computing. Провідні світові оператори систем розподілу впроваджують

					ДП.АКИТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

програмне забезпечення класу MDMS нового покоління, інтегроване з алгоритмами штучного інтелекту та прогнозними моделями машинного навчання. Замість простої фіксації комерційних показників раз на добу, сучасні світові системи здійснюють потокову аналітику великих масивів даних з періодичністю оновлення інформації від 1 до 15 хвилин. Це дозволяє реалізувати концепцію Digital Twin – цифрового двійника енергомережі, за допомогою якого здійснюється предиктивний моніторинг стану трансформаторного обладнання, автоматичне визначення локалізації комерційних та технічних втрат, а також миттєве виявлення аварійних режимів і пошкоджень ліній без отримання заявок від споживачів.

Особливе місце у світовій практиці посідає інтеграція систем розумного обліку з ринковими механізмами гнучкості – Flexibility Markets. У країнах Скандинавії та Західної Європи системи АМІ інтегровані з операторами спотових ринків електричної енергії, що дозволяє застосовувати тарифікацію в реальному часі для всіх категорій споживачів. За такої моделі вартість електроенергії для кінцевого користувача змінюється щогодини або щопівгодини залежно від поточного балансу генерації з відновлюваних джерел та загального навантаження в системі. Це створює умови для автоматичного функціонування систем Demand Response, коли інтелектуальні лічильники взаємодіють із домашніми контролерами енергоменеджменту, зміщуючи цикли роботи теплових насосів, кліматичних систем та зарядних станцій електромобілів на години з мінімальною вартістю ресурсу. Таким чином мінімізуються пікові навантаження на розподільчі мережі та оптимізується використання капітальних інвестицій у будівництво нових ліній електропередач.

Дослідження світового досвіду дозволяє визначити чіткі технологічні орієнтири для модернізації енергетичного сектору України, де впровадження багатьох критично необхідних елементів наразі перебуває на початковій стадії. Першочерговим та вкрай актуальним завданням для українських операторів систем розподілу є перехід від локальних, ізольованих систем до створення єдиної національної платформи обліку даних, що функціонує за уніфікованими

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

міжнародними стандартами обміну інформацією. Відсутність такого централізованого архітектурного рішення в Україні створює інформаційну асиметрію між постачальниками, операторами мереж та споживачами, що значно ускладнює процеси зміни постачальника та верифікації даних на ринку на добу наперед.

З урахуванням специфічних воєнних ризиків, тривалого дефіциту генеруючих потужностей та регулярної загрози виникнення системних аварій в Україні, критично доречним є запозичення світового досвіду впровадження функцій автоматичного балансування на низьковольтному рівні, так званих мікромереж або Microgrids. Для вітчизняних умов перспективним орієнтиром є обов’язкова інтеграція інтелектуальних приладів обліку з локальними системами керування відключеннями – Outage Management Systems. У світовій практиці лічильники класу AMI 2.0 оснащуються функцією «останнього подиху» – спеціальним апаратним конденсатором, який дозволяє пристрою в момент повного знеструмлення відправити короткий радіосигнал про втрату живлення. Впровадження цієї технології в Україні дозволило б диспетчерським службам автоматично, без участі персоналу та дзвінків споживачів, формувати точну топологічну карту пошкоджень мережі під час блекаутів, суттєво скорочуючи час на проведення аварійно-відновлювальних робіт.

Додатково, зважаючи на стрімке збільшення кількості побутових споживачів з власними джерелами генерації та накопичувачами енергії в Україні, вітчизняна система обліку має переорієнтуватися на масове підтримання архітектури Vehicle-to-Grid та технологій взаємодії з розподіленими енергетичними ресурсами. Світовий досвід доводить, що за умови належного рівня автоматизації збору даних, тисячі локальних акумуляторних систем та сонячних інверторів споживачів можуть бути об’єднані в єдину віртуальну електростанцію. Завдяки високошвидкісним каналам зв’язку інфраструктури AMI, такий консолідований ресурс здатний за командою центрального диспетчера видавати потужність у мережу в пікові години або знижувати споживання, виступаючи ефективним інструментом ліквідації дефіциту

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

потужності. Тож, орієнтація на передові міжнародні стандарти інтелектуального обліку другого покоління та потокової аналітики є базовою передумовою для трансформації пошкодженої централізованої радянської інфраструктури в децентралізовану, стійку до зовнішніх загроз та технологічно гнучку енергосистему європейського зразка.

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2 ОБҐРУНТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ ТА ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ

Результати комплексного дослідження сучасного стану енергетичного сектору України, наведені у першому розділі, переконливо доводять, що ключовим вектором розвитку вітчизняних систем обліку є впровадження концепції Smart Grid. В умовах децентралізації генерації, частих аварійних відключень, зумовлених дефіцитом потужності та пошкодженнями інфраструктури, а також за наявності динамічних багатотарифних планів, традиційні підходи до побудови АСКОЕ демонструють низьку відмовостійкість. Пряме радіальне підключення сотень або тисяч первинних приладів обліку безпосередньо до центрального хмарного сервера Обленерго через канали стільникового зв'язку має низьку критичних недоліків. Під час масових вимкнень електроенергії базові станції операторів зв'язку зазнають перевантаження або вимикаються через вичерпання ресурсу резервних акумуляторів, що призводить до повної втрати контролю над профілями навантаження. Крім того, постійний паралельний запит до великої кількості точок обліку створює надлишкове обчислювальне навантаження на базу даних верхнього рівня та критично залежить від стабільності пропускної здатності каналу.

Для подолання цих технологічних викликів запропоновано та обґрунтовано використання класичної трирівневої ієрархічної архітектури АСКОЕ, де функцію інтелектуального координатора та буфера даних виконує середній рівень – пристрій збору та передачі даних, або концентратор. Основним завданням проектного ПЗПД є децентралізація процесу збору інформації та забезпечення автономності локального сегмента енергомережі, такого як багатоквартирний будинок, промислове підприємство або трансформаторна підстанція.

Застосування терміну “інтелектуальний вузол” щодо проектного пристрою зумовлене його здатністю реалізувати концепцію периферійних обчислень, коли первинна обробка та прийняття рішень відбуваються

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

безпосередньо на місці виникнення даних, а не на віддаленому сервері. На відміну від застарілих репітерів, які лише транслювали незмінені байти з одного інтерфейсу в інший, сучасне ПЗПД самостійно керує логікою опитування, оцінює якість інформації, фільтрує завади та координує роботу підключеної периферії.

Процес функціонування цього інтелектуального вузла базується на чіткій послідовній міграції та перетворенні інформаційних потоків. На першому етапі внутрішній планувальник ядра концентратора ініціює цикли збору комерційних показників та миттєвих параметрів мережі з лічильників через фізично захищену провідникову шину RS-485. Для цього використовується апаратний драйвер послідовного порту, який динамічно керує лінією перемикання прийому та передачі, що необхідно для коректної організації напівдуплексного зв'язку. Сирі байтові масиви відповіді, отримані з фізичного дроту, передаються на наступний логічний рівень, де відбувається їхнє декодування відповідно до обраного промислового протоколу зв'язку.

На етапі декодування система виконує критично важливу функцію логічної валідації та аналізу якості отриманих даних. Програмне забезпечення концентратора обчислює контрольну суму прийнятого пакета та порівнює її зі стандартом, закладеним у протоколі. Якщо перевірка успішна, набори бітів та регістрів трансформуються у зрозумілі фізичні величини, такі як напруга, струм, частота.

Важливою ознакою інтелектуальності вузла на цьому кроці є маркування інформації: кожному зчитаному значенню присвоюється специфічна бітова маска якості, яка дозволяє виявити помилки зв'язку, таймауту відповіді лічильника або апаратні збої периферії. Це відсікає недостовірну інформацію ще до моменту її потрапляння в архівосховища та сигналізує диспетчеру про технічні проблеми на лінії.

Після успішної верифікації структурований масив даних спрямовується до локального енергонезалежного сховища, побудованого на базі реляційної моделі даних під керуванням компактної СКБД SQLite. Програмне ядро виконує

					ДП.АКИТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

масовий оптимізований запис транзакцій, формуючи тридцятихвилинні профілі потужності, фіксуючи поточні тарифні зони та наповнюючи журнали подій. Наявність локального сховища є визначальним фактором живучості системи в умовах сучасних кризових режимів енергетики України.

Якщо під час тривалого блекауту повністю зникає зовнішній зв'язок із серверами Обленерго, концентратор продовжує функціонувати в автономному режимі, накопичуючи комерційну інформацію на внутрішній флешпам'яті протягом тривалого часу, що може досягати дев'яноста діб. Тільки-но зовнішній канал зв'язку через GSM або Ethernet відновлюється, інтелектуальний вузол автоматично ініціює фінальний етап диспетчеризації – пакетне вивантаження збережених архівів на верхній рівень АСКОЕ без жодної втрати фінансово значущих даних.

Для забезпечення гнучкості розробки та простоти подальшої модернізації проєктовану систему розділено на чіткі апаратні та програмні модулі. Апаратна складова охоплює мікропроцесорні лічильники з підтримкою інтерфейсу RS-485, лінії зв'язку із захисними елементами гальванічної розв'язки та обчислювальний модуль самого концентратора, побудований на базі енергоефективної ARM-архітектури під керуванням вбудованої операційної системи Linux.

Програмне забезпечення інтелектуального вузла реалізується за допомогою модульного підходу із використанням стандартів мов C та C++. Такий вибір забезпечує максимальну швидкодію програмного коду, мінімальне споживання оперативної пам'яті плати контролера та дає можливість безпосереднього низькорівневого керування апаратними реєстрами вводу-виводу послідовних портів. Проєктування логічної структури цього програмного комплексу починається з розробки базового логічного та математичного базису системи, що визначає уніфіковані типи даних, структури фізичних величин, конфігураційні параметри інтерфейсів та класифікатор статусів системних помилок.

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2.1 Розробка базових типів даних та конфігураційних структур системи

Створення складних програмних комплексів у сфері автоматизації енергетичних систем вимагає ретельного проектування їхнього цифрового фундаментального рівня. Таким базисом виступає простір уніфікованих типів даних, констант та структур. Помилки на етапі архітектурного планування цього рівня призводять до виникнення системних розбіжностей під час передачі інформації між ізольованими модулями. Це змушує розробника створювати додаткові функції-перехідники для конвертації форматів, що штучно збільшує обсяг коду, підвищує ризик появи прихованих дефектів при роботі з пам'яттю та знижує загальну швидкодію системи.

Для проектного ПЗПД обрано концепцію єдиного наскрізного простору типів, зосередженого в модулі `askoe_types.h`. Абсолютно всі компоненти системи, включаючи драйвер послідовного порту, шар реалізації протоколу Modbus RTU, програмні модулі конкретних моделей лічильників та інтерфейс взаємодії з базою даних, використовують однакові, заздалегідь визначені структури. Даний підхід усуває потребу в трансформації форматів даних на стиках різних рівнів абстракції.

Для автоматизації процесу керування збіркою, комбінування файлів та гнучкого налаштування параметрів компіляції всього проєкту застосовано крос-платформну систему CMake. На рисунку 2.1.1 представлено розширену конфігурацію головного файлу збірки CMakeLists.txt, який керує процесом перетворення вихідного тексту програми на готовий до запуску бінарний файл:

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

CMake

```
cmake_minimum_required(VERSION 3.16)
project(ASKOE VERSION 1.0.0 LANGUAGES C CXX)

set(CMAKE_C_STANDARD 11)
set(CMAKE_CXX_STANDARD 17)
set(CMAKE_CXX_STANDARD_REQUIRED ON)

option(ASKOE_ENABLE_RS485 "Enable RS-485 / Modbus RTU interface" ON)
option(ASKOE_ENABLE_IEC "Enable IEC 62056-21 (optical port)" OFF)
option(ASKOE_ENABLE_DLMS "Enable DLMS/COSEM (GSM/Ethernet)" OFF)
option(ASKOE_ENABLE_TESTS "Build unit tests" ON)

add_compile_options(
    -Wall -Wextra -Wpedantic
    -Wno-unused-parameter
)

add_subdirectory(src)

if(ASKOE_ENABLE_TESTS)
    enable_testing()
    add_subdirectory(tests)
endif()

message(STATUS "ASKOE build configuration:")
message(STATUS "  RS-485/Modbus : ${ASKOE_ENABLE_RS485}")
message(STATUS "  IEC 62056-21 : ${ASKOE_ENABLE_IEC}")
message(STATUS "  DLMS/COSEM : ${ASKOE_ENABLE_DLMS}")
```

Рисунок 2.1 – Головний файл збірки CMakeLists.txt

Вибір мовного стандарту та інструментів збірки зумовлений специфікою розробки для вбудованих систем із обмеженими апаратними ресурсами оперативної та постійної пам'яті. Фіксація стандарту C11 для низькорівневих модулів HAL та Modbus забезпечує мінімальний розмір підсумкового бінарного файлу та прямий доступ до системних викликів операційної системи Linux. Водночас активація стандарту C++17 для високорівневої логіки планувальника чи черги транзакцій дозволяє використовувати безпечні сучасні контейнери, розумні покажчики та об'єктно-орієнтовані патерни, що прискорює інтеграцію модулів без втрати обчислювальної швидкодії.

					ДП.АКИТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Порівняльний аналіз із високорівневими інтерпретованими мовами програмування показує, що реалізація такого ядра на базі архітектур із динамічним виділенням пам'яті та автоматичним збиранням сміття призводить до значного перевитрачання апаратних ресурсів контролера, а також робить час реакції системи на таймаути ліній зв'язку непередбачуваним.

Використання конфігураційних опцій у CMake дозволяє оптимізувати розмір програми під конкретний об'єкт автоматизації. Якщо ПЗПД встановлюється в сегменті мережі без лінійної периферії певного типу, відповідний програмний модуль повністю виключається зі збірки на етапі компіляції, не займаючи місця у флешпам'яті пристрою. Прапори суворого аналізу коду компілятора гарантують виявлення потенційних дефектів виходу за межі масивів або некоректного приведення типів до моменту запуску системи в експлуатацію.

Після налаштування інструментів компіляції необхідно розібрати внутрішню структуру заголовного файлу базових типів `askoe_types.h`, який визначає логічну модель даних для всіх компонентів системи:

```

C

#pragma once

#include <stdint.h>
#include <stddef.h>
#include <time.h>

#ifdef __cplusplus
extern "C" {
#endif

```

Рисунок 2.2 – Інженерна адресація

Інженерний аналіз структури заголовного файлу підтверджує відповідність обраних типів даних фізичним параметрам реального промислового обладнання. Константа `MAX_METERS_PER_RTU` зафіксована на значенні 247 згідно із жорсткими обмеженнями специфікації протоколу Modbus RTU, де поле адреси

					ДП.АКИТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

пристрою обмежене одним байтом пам'яті, а адреси вище вказаної межі зарезервовані для широкомовних та службових команд. Відхилення від концепції динамічних адресних списків на користь фіксованих констант забезпечує передбачуваність споживання пам'яті програмним ядром під час інтенсивних циклів опитування.

```
typedef uint32_t meter_id_t;
typedef uint16_t channel_id_t;
typedef uint8_t device_addr_t;

#define METER_ID_INVALID ((meter_id_t)0xFFFFFFFF)
#define MAX_METERS_PER_RTU 247
#define MAX_CHANNELS 16
#define SERIAL_LEN 32

/* — Класифікатор підтримуваних протоколів зв'язку — */

typedef enum {
    PROTO_NONE = 0,
    PROTO_MODBUS_RTU = 1,
    PROTO_IEC_62056 = 2,
    PROTO_DLMS_COSEM = 3,
    PROTO_SML = 4,
} proto_type_t;

/* — Класифікатор тарифних зон (Багатотарифний облік) — */

typedef enum {
    TARIFF_TOTAL = 0,
    TARIFF_T1 = 1,
    TARIFF_T2 = 2,
    TARIFF_T3 = 3,
    TARIFF_MAX = 4,
} tariff_zone_t;

/* — Уніфіковані фізичні одиниці вимірювання — */
```

Рисунок 2.3 – Системні типи та протоколи обміну ПЗПД

Застосування переліків для ідентифікації протоколів зв'язку, тарифних зон та фізичних одиниць вимірювання є архітектурним рішенням, спрямованим на оптимізацію використання обчислювальних ресурсів. Заміна текстового представлення конфігураційних параметрів на типізовані переліки дозволяє

					ДП.АКИТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

компілятору трансформувати кожне текстове значення в однобайтну цілочисельну константу. Це повністю виключає тривалі операції посимвольного порівняння рядків під час функціонування планувальника та підвищує загальну продуктивність вбудованого мікропроцесора.

```
typedef enum {
    UNIT_KWH      = 0,
    UNIT_KWH_IN   = 1,
    UNIT_KW       = 2,
    UNIT_KVAR     = 3,
    UNIT_V        = 4,
    UNIT_A        = 5,
    UNIT_HZ       = 6,
    UNIT_COS_PHI  = 7,
} phys_unit_t;

/* — Структура одного атомарного вимірювання — */

typedef struct {
    meter_id_t    meter_id;
    time_t        timestamp;
    tariff_zone_t tariff;
    phys_unit_t    unit;
    double         value;
    uint8_t        quality;
} meter_reading_t;

#define QUALITY_OK            0x00
#define QUALITY_COMM_ERR     0x01
#define QUALITY_CRC_ERR      0x02
#define QUALITY_TIMEOUT      0x04
#define QUALITY_OVERFLOW     0x08
#define QUALITY_ESTIMATED    0x10
#define QUALITY_MANUAL       0x20

/* — Конфігураційна карта конкретної точки обліку — */

typedef struct {
    meter_id_t    id;
    char           serial[SERIAL_LEN];
    device_addr_t bus_address;
    proto_type_t  protocol;
    uint32_t       baud_rate;
    uint8_t        data_bits;
    uint8_t        stop_bits;
    char           parity;
    uint16_t       poll_interval_s;
    uint8_t        retry_count;
    uint16_t       timeout_ms;
    uint8_t        enabled;
} meter_config_t;

/* — Конфігурація фізичного послідовного порту ПЗПД — */
```

Рисунок 2.4 – Структури вимірювань та конфігурації точок обліку ПЗПД

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Серцем інформаційної структури вимірювань виступає компонент `meter_reading_t`. Поле `timestamp` використовує стандартний тип `time_t`, що відображає мітку часу у секундах за стандартом UNIX Epoch. Відмова від використання складних рядкових форматів представлення дати і часу дозволяє процесору здійснювати хронологічне порівняння вимірювань за допомогою однієї базової арифметичної операції, що є критично важливим фактором при верифікації профілів потужності під час багатотарифного обліку.

Поле числового значення `value` реалізоване через тип даних подвійної точності `double`. Застосування цілих чисел у даному контексті є неможливим через потребу фіксації дробових часток кіловат-годин. Використання стандартного типу одинарної точності `float` також було відкинуто, оскільки при тривалому безперервному накопиченні великих об'ємів спожитої енергії обмежена розрядність типу `float` призводить до виникнення похибок округлення, що є неприпустимим для систем комерційного розрахунку.

Система бітових масок поля `quality` реалізує функцію безперервної периферійної діагностики стану мережі. Програма не перериває свій життєвий цикл при виникненні апаратних збоїв чи завад, а маркує кожне вимірювання відповідним бітовим прапорцем якості. Наявність масок помилок CRC, таймаутів чи апаратного втручання в корпус лічильника дозволяє верхньому рівню АСКОЕ отримувати деталізовану інформацію про технічний стан та рівень безпеки всього вимірювального комплексу в режимі реального часу.

Конфігураційні параметри системної магістралі зв'язку та правила взаємодії з операційним середовищем Linux консолідовані у структурі `rtu_config_t`. Поле `port` представляє собою символьний масив, який зберігає шлях до файлу пристрою в операційній системі. Таке рішення зумовлене архітектурою операційних систем сімейства Unix, де будь-яке апаратне забезпечення та інтерфейси обміну представляються у вигляді звичайних файлів у каталозі системних пристроїв. Поля `baud_rate`, `data_bits`, `stop_bits` та `parity` визначають низькорівневий формат кодування інформаційних пакетів, що є критично важливим для синхронізації приймача та передавача на фізичному рівні.

					ДП.АКИТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Особливе інженерне значення має параметр `inter_frame_delay_ms`, який задає примусову технологічну паузу між послідовними пакетами даних. Оскільки промислова шина RS-485 функціонує в напівдуплексному режимі, відсутність часового інтервалу спокою призводить до злиття пакетів запиту та відповіді, що унеможлиблює їхнє коректне розпізнавання програмним ядром. Поле `rs485_rts_enable` виступає апаратним прапорцем дозову керування лінією запиту на передачу, що забезпечує автоматичне перемикання трансивера з режиму прийому в режим трансляції бітів безпосередньо на рівні драйвера ядра операційної системи.

```
typedef struct {
    char        port[64];
    uint32_t    baud_rate;
    uint8_t     data_bits;
    uint8_t     stop_bits;
    char        parity;
    uint16_t    inter_frame_delay_ms;
    uint8_t     rs485_rts_enable;
} rtu_config_t;

/* ——— Параметри локального сховища даних ——— */

typedef struct {
    char        db_path[256];
    uint32_t    retention_days;
    uint32_t    flush_interval_s;
    size_t      cache_size_mb;
} storage_config_t;

/* ——— Глобальна карта конфігурації ядра ПЗПД ——— */

typedef struct {
    rtu_config_t    rtu;
    storage_config_t storage;
    meter_config_t *meters;
    size_t          meter_count;
    char            log_path[256];
    uint8_t         log_level;
} askoe_config_t;

/* ——— Загальний класифікатор результатів та помилок ——— */
```

Рисунок 2.5 – Глобальні константи та параметри сховища ПЗПД

					ДП.АКИТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Параметри функціонування підсистеми периферійного накопичення інформації зосереджені у структурі `storage_config_t`. Символьний рядок `db_path` визначає локальну адресу розміщення файлу реляційної бази даних на твердотільному носії пристрою. Параметр `retention_days` задає глибину часового архіву комерційних показників та автоматично обмежує термін зберігання інформації. Це запобігає повному вичерпанню вільного простору на інтегрованій карті пам'яті ПЗПД шляхом циклічного видалення застарілих записів, які вже були успішно передані на верхній рівень АСКОЕ. Поле `flush_interval_s` визначає періодичність синхронізації даних, задаючи інтервал часу, через який накопичені в оперативній пам'яті вимірювання примусово переносяться на постійний диск. Конфігурація об'єму пам'яті `cache_size_mb` виділяє фіксований обсяг оперативної пам'яті під тимчасові операції, що дозволяє суттєво зменшити кількість прямих звернень до флешпам'яті, продовжуючи ресурс її надійної експлуатації в умовах безперервного циклу запису.

```
typedef enum {
    ASKOE_OK                = 0,
    ASKOE_ERR_TIMEOUT      = -1,
    ASKOE_ERR_CRC          = -2,
    ASKOE_ERR_NO_RESPONSE  = -3,
    ASKOE_ERR_PROTOCOL     = -4,
    ASKOE_ERR_IO           = -5,
    ASKOE_ERR_CONFIG       = -6,
    ASKOE_ERR_STORAGE      = -7,
    ASKOE_ERR_MEMORY       = -8,
    ASKOE_ERR_BUSY         = -9,
} askoe_status_t;

const char* askoe_status_str(askoe_status_t s);

#ifdef __cplusplus
}
#endif
```

Рисунок 2.6 – Класифікатор статусів виконання та системних помилок ПЗПД

Глобальна координація всіх програмних модулів забезпечується через об'єднуючу структуру `askoe_config_t`. Вона виступає єдиною точкою

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

конфігурації всього ядра ПЗПД та інкапсулює всередині себе структури налаштувань зв'язку, параметри дискових архівів, а також покажчик на динамічний масив підключених лічильників meters із фіксацією їхньої точної кількості через змінну meter_count. Поля log_path та log_level відповідають за роботу діагностичного модуля, визначаючи місце збереження файлу системних звітів та ступінь деталізації фіксації подій від запису лише критичних аварій до повного трасування байтових потоків.

Завершальним елементом логічного базису системи є типізований перелік результатів виконання операцій askoe_status_t разом із функцією askoe_status_str. Замість використання стандартних або випадкових числових кодів помилок, уся програма оперує суворими від'ємними статусами, кожен з яких описує конкретну деструктивну подію, таку як таймаут відповіді, порушення контрольної суми або апаратний збій введення-виведення. Функція перетворення статусів у текстовий рядок забезпечує трансформацію внутрішніх числових кодів у зрозумілі інженерні повідомлення, які автоматично заносяться до системного журналу, спрощуючи процес відладки та технічного обслуговування ПЗПД під час експлуатації.

2.2 Обґрунтування вибору апаратної платформи та операційного середовища ПЗПД

Ефективність, надійність та відмовостійкість функціонування розроблюваного програмного комплексу інтелектуального пристрою збору та передачі даних перебувають у прямій залежності від параметрів обчислювальної платформи, на якій здійснюється його безпосереднє розгортання. З огляду на специфіку експлуатації в сучасних реаліях енергетичного сектору, до апаратного забезпечення висуваються жорсткі, а подекуди й безкомпромісні вимоги щодо енергоефективності, термічної стійкості, обчислювальної потужності та наявності інтегрованих апаратних інтерфейсів введення-виведення. Оскільки

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

обладнання має безперервно функціонувати в умовах нестабільного централізованого електропостачання та тривалих аварійних або планових вимкнень напруги, тривала життєздатність локального сегмента обліку покладається на обмежений ресурс акумуляторних батарей або джерел безперебійного живлення.

Аналіз існуючих рішень показує, що використання стандартних промислових обчислювальних платформ на базі повнорозмірних архітур типу x86 є повністю недоцільним та економічно необґрунтованим. Головним деструктивним фактором у даному контексті виступає високе питоме енергоспоживання процесорів даного сімейства. Платформа x86 потребує постійного активного або потужного пасивного охолодження, значних об'ємів живлення та громіздких блоків трансформації напруги. У режимі тривалого блекауту такий контролер виснажить акумуляторні батареї резервного живлення за лічені години, що призведе до повної втрати контролю над профілями навантаження мережі у найкритичніший період. Крім того, архітектура x86 орієнтована на вирішення універсальних мультимедійних та серверних завдань, що зумовлює наявність великої кількості надлишкових блоків у кристалі процесора, які не використовуються для циклічного опитування периферійних приладів обліку, але споживають електричну енергію.

Альтернативний варіант у вигляді побудови системи на базі простих восьмибітних або шістнадцятибітних мікроконтролерів сімейства AVR чи PIC також має суттєві обмеження, які роблять його непридатним для реалізації сучасних інтелектуальних функцій. Обмежений об'єм оперативної пам'яті, який у таких чіпах часто вимірюється кілобайтами, унеможливорює розгортання повноцінної реляційної бази даних та створення великих буферів для тимчасового зберігання тримісячних комерційних архівів. Обчислювальна потужність низькопродуктивних мікроконтролерів є недостатньою для паралельного кодування інформаційних потоків, шифрування пакетів за сучасними криптографічними стандартами та одночасної підтримки декількох складних мережевих протоколів. Навіть базова операція сортування великого

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

масиву вимірювань або обчислення контрольних сум для десятків лічильників може викликати критичне зависання однопоточного мікроконтролера.

З огляду на вказані технологічні обмеження, найбільш обґрунтованим є застосування енергоефективних одноплатних обчислювальних модулів на базі тридцятидвохбітної мікропроцесорної архітектури ARM Cortex-A. Дане апаратне рішення володіє оптимальним та збалансованим співвідношенням обчислювальної продуктивності на кожен ват споживаної потужності. Платформи ARM інтегрують у собі багатоядерні обчислювальні блоки, здатні легко розподіляти завдання опитування, обробки та збереження даних між різними потоками. При цьому рівень тепловиділення залишається мінімальним, що дозволяє відмовитися від рухомих елементів охолодження та монтувати обладнання у герметичні пластикові або металеві шафи на підстанціях, де присутній високий рівень пилу та вологості.

Організація енергонезалежної пам'яті на базі промислових твердотільних модулів типу eMMC забезпечує високу швидкість доступу до таблиць бази даних та гарантує стійкість системи до багаторазових циклів перезапису. Звичайні карти пам'яті споживчого класу швидко виходять з ладу через специфіку безперервного фіксування тридцятихвилинних профілів потужності, тоді як промислові накопичувачі мають інтегровані алгоритми вирівнювання зносу осередків пам'яті та захисту від раптового зникнення живлення.

Важливим аспектом проектування апаратної частини є узгодження фізичних інтерфейсів зв'язку між центральним процесором та магістральною шиною лічильників. Внутрішні логічні рівні сучасних ARM-процесорів оперують низькими напругами, тоді як промислова диференціальна шина RS-485 потребує суттєво вищих амплітуд сигналів та високої стійкості до зовнішніх електромагнітних завад. Спроба прямого підключення ліній процесора до загальної шини призведе до миттєвого вигорання кремнієвого кристала при першому ж стрибку напруги в силовій мережі.

Для усунення цього ризику передбачено обов'язкове застосування спеціалізованих мікросхем-трансиверів із вбудованою гальванічною розв'язкою

					ДП.АКИТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

та оптичною ізоляцією ліній. Такий підхід дозволяє повністю відсікти центральний обчислювальний блок від високовольтних імпульсних наведень, грозових розрядів та комутаційних сплесків, які є невід’ємною частиною функціонування розподільчих щитів та трансформаторних підстанцій. Повний топологічний зв’язок апаратних вузлів проектного обладнання представлений на Рисунок 2.7.

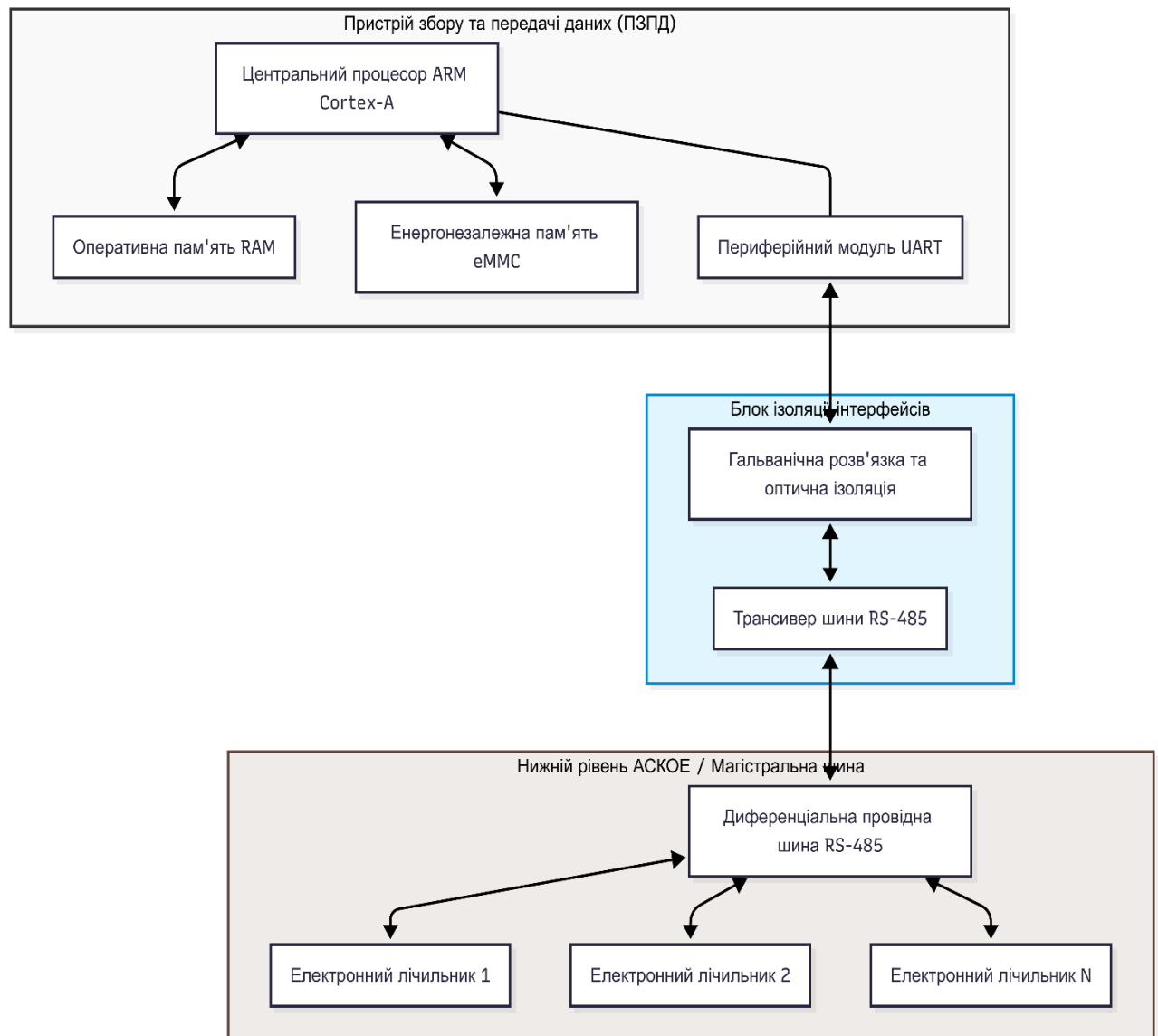


Рисунок 2.7 – Структурна схема апаратної архітектури ПЗПД

Вибір операційного середовища для функціонування розробленого програмного ядра також підлягав ретельному аналізу. Використання операційних систем сімейства Windows вбудованого типу було відкинуто через

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

їхню закриту архітектуру, високу вартість ліцензування та надмірну вимогливість до об'єму оперативної пам'яті й вільного простору на накопичувачі. Крім того, комерційні закриті системи містять велику кількість фонових служб та процесів, які неможливо повністю вимкнути, і які безперервно витрачають ресурси процесора на виконання сторонніх завдань. Побудова системи без використання операційної системи взагалі, тобто за принципом чистого заліза, обмежує можливості масштабування та суттєво ускладнює роботу з мережевими протоколами верхнього рівня, такими як TCP/IP або розгортання захищених веб-інтерфейсів для конфігурування.

Як базове операційне середовище обрано спеціалізовану збірку вбудованої операційної системи Linux. Виокремлення цієї системи зумовлене її високою стабільністю, монолітною архітектурою ядра з можливістю тонкого налаштування під конкретну апаратну конфігурацію, а також наявністю розвиненого, перевіреного часом інструментарію для роботи з послідовними інтерфейсами. Застосування Embedded Linux дозволяє повністю абстрагувати високорівневе програмне забезпечення від конкретної ревізії або виробника апаратної плати, забезпечуючи крос-платформність розробки.

Програмний код, написаний стандартною мовою C, взаємодіє з портами RS-485 через уніфіковані системні виклики операційної системи, що спрощує подальшу модернізацію системи або повну заміну обчислювального модуля на пристрій іншого класу без необхідності коригування логіки верхнього рівня. Безпека, відсутність ліцензійних відрахувань, відкритий вихідний код та можливість створення відмовостійких закритих файлових систем роблять Embedded Linux єдиним раціональним вибором для побудови промислових пристроїв збору та передачі даних. Використання стандартних драйверів ядра операційної системи дозволяє реалізувати детерміновану обробку переривань від послідовних інтерфейсів з мінімальним рівнем затримок. Наявність вбудованих підсистем керування пам'яттю забезпечує надійну ізоляцію адресних просторів окремих процесів, виключаючи взаємний деструктивний вплив модулів у разі виникнення критичних програмних збоїв. Додатковою

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

перевагою такого середовища є можливість інтеграції мережевих стеків захисту інформації безпосередньо на рівні системних служб, що гарантує цілісність даних при їхній подальшій трансляції. Логічний розподіл функціональних шарів програмного забезпечення в обраному операційному середовищі наведено на Рисунок 2.8.

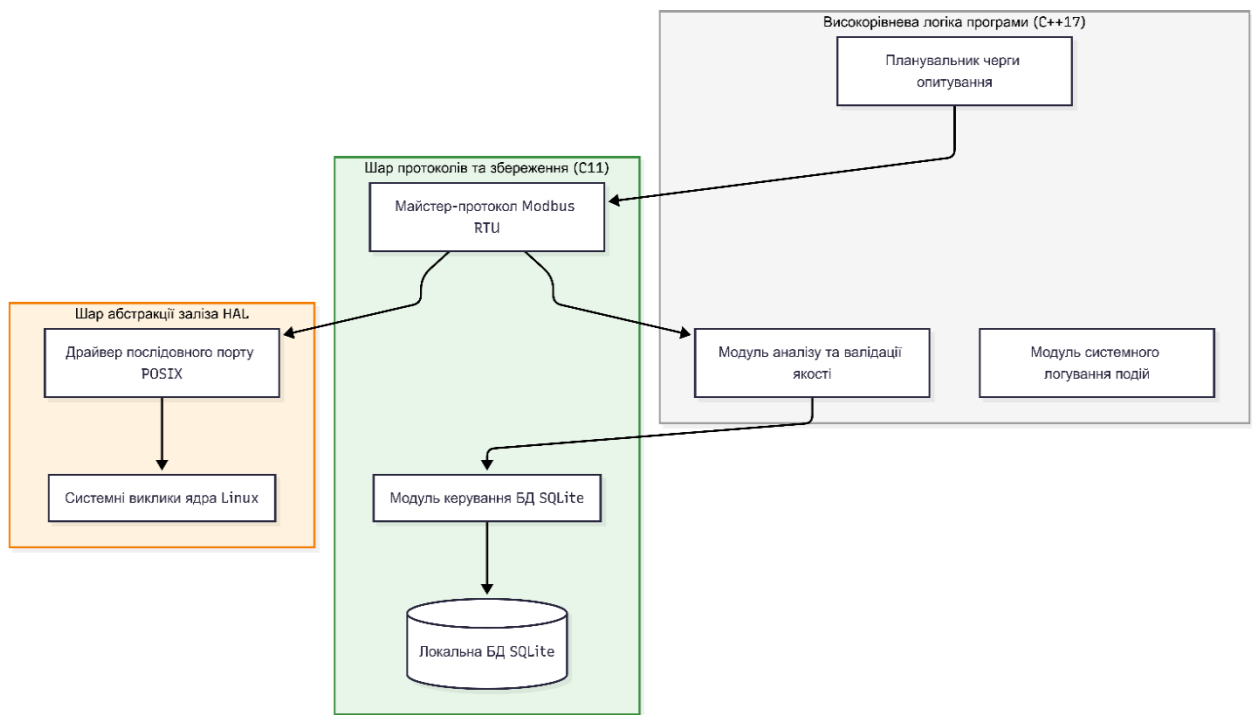


Рисунок 2.8 – Схема логічної архітектури програмного забезпечення ПЗПД

2.3 Програмна реалізація модулів опитування периферійних приладів обліку та системної діагностики

Для забезпечення довгострокової автономності та високої живучості інтелектуального пристрою збору та передачі даних в умовах нестабільного зв'язку, програмне забезпечення повинно мати чітко типізовану структуру керування ресурсами пам'яті, конфігураційними потоками та системними прериваннями. Нижній рівень архітектури коду фокусується на параметризації локальних дискових сховищ, консолідації налаштувань усього обчислювального ядра та стандартизації кодів відстеження системних збоїв

```

/* ——— Параметри локального сховища даних ——— */
typedef struct {
    char        db_path[256];
    uint32_t    retention_days;
    uint32_t    flush_interval_s;
    size_t      cache_size_mb;
} storage_config_t;

/* ——— Глобальна карта конфігурації ядра ПЗПД ——— */
typedef struct {
    rtu_config_t    rtu;
    storage_config_t storage;
    meter_config_t  *meters;
    size_t          meter_count;
    char            log_path[256];
    uint8_t         log_level;
} askoe_config_t;

/* ——— Загальний класифікатор результатів та помилок ——— */
typedef enum {
    ASKOE_OK           = 0,
    ASKOE_ERR_TIMEOUT  = -1,
    ASKOE_ERR_CRC       = -2,
    ASKOE_ERR_NO_RESPONSE = -3,
    ASKOE_ERR_PROTOCOL  = -4,
    ASKOE_ERR_IO        = -5,
    ASKOE_ERR_CONFIG    = -6,
    ASKOE_ERR_STORAGE   = -7,
    ASKOE_ERR_MEMORY    = -8,
    ASKOE_ERR_BUSY      = -9,
} askoe_status_t;

const char* askoe_status_str(askoe_status_t s);

#ifdef __cplusplus
}
#endif

```

Рисунок 2.9 – Програмні інтерфейси керування пам'яттю та логічної діагностики ПЗПД

Організація надійної підсистеми периферійного накопичення інформації базується на використанні структури `storage_config_t`. Символьний масив `db_path` виділяє фіксований буфер розміром 256 байт для збереження абсолютного шляху до файлу вбудованої бази даних SQLite. Обмеження терміну актуальності інформації покладається на параметр `retention_days`. Ця змінна задає глибину історичного архіву в днях, що дозволяє автоматичі пристрою самостійно ініціювати процедуру очищення застарілих записів. Таке рішення

					ДП.АКИТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

запобігає неконтрольованому розростанню файлу бази даних та захищає eMMC-накопичувач від переповнення.

Параметри `flush_interval_s` та `cache_size_mb` вирішують критичну проблему обмеженого ресурсу циклів перезапису флешпам'яті в промислових контролерах. Замість виконання прямого дискового запису при кожному отриманні даних від лічильників, система використовує відкладену синхронізацію. Показники накопичуються в оперативній пам'яті в межах ліміту, заданого у мегабайтах через `cache_size_mb`, і примусово скидаються на енергонезалежний носій лише після вичерпання часового таймера `flush_interval_s`. Це мінімізує кількість операцій введення-виведення та суттєво продовжує термін експлуатації заліза.

Для централізації управління всіма підсистемами розроблено об'єднуючу структуру `askoe_config_t`, яка виступає єдиною точкою доступу до налаштувань ядра програми. Вона інкапсулює параметри фізичної магістралі зв'язку `rtu` та конфігурацію сховища `storage`. Зв'язок із підключеними приладами обліку реалізовано через динамічний покажчик `meters` на масив структур типу `meter_config_t`. Точний розмір цього масиву фіксується у змінній `meter_count`, що дозволяє ядру динамічно виділяти пам'ять та організовувати цикли опитування без жорсткого обмеження кількості підключених точок обліку на етапі компіляції. Додатково структура містить параметри підсистеми діагностичного документування: символьний масив `log_path` визначає місце зберігання текстових звітів роботи програми, а прапорець `log_level` задає ступінь деталізації логування подій.

Забезпечення стійкості логіки пристрою до позаштатних режимів роботи та апаратних аварій базується на строгому переліку `askoe_status_t`. Використання переліку (enum) з чітко закріпленими від'ємними числовими значеннями дозволяє відмовитися від практики використання випадкових або розмитих кодів помилок. Кожна позиція переліку відповідає за конкретний деструктивний фактор: наприклад, `ASKOE_ERR_TIMEOUT` сигналізує про повну відсутність реакції приладу на запит, `ASKOE_ERR_CRC` чітко вказує на наявність сильних

					ДП.АКИТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

завад у лінії зв'язку, які спотворили пакет, а ASKOE_ERR_STORAGE та ASKOE_ERR_MEMORY ідентифікують критичні внутрішні проблеми збоїв заліза самого контролера.

Застосування функції askoe_status_str забезпечує десеріалізацію кодів помилок. Вона приймає числовий ідентифікатор статусу та повертає вказівник на зрозумілий текстовий рядок. Це унеможливлює неоднозначність трактування внутрішніх системних збоїв під час автоматичного запису подій у файл журналу, спрощуючи віддалену діагностику ПЗПД диспетчерськими службами без необхідності демонтажу пристрою з об'єкта енергетики. Заключні директиви умовного компілятора __cplusplus гарантують сумісність даного низькорівневого С-інтерфейсу з високорівневими модулями аналітики, якщо вони будуть розроблятися за допомогою об'єктно-орієнтованої мови С++.

Для забезпечення цілісності сприйняття розроблених структур даних та модулів діагностики, архітектуру програмного забезпечення ПЗПД доцільно представити у вигляді багаторівневої структури. Така організація дозволяє чітко розділити зони відповідальності між низькорівневим системним кодом та високорівневою бізнес-логікою.

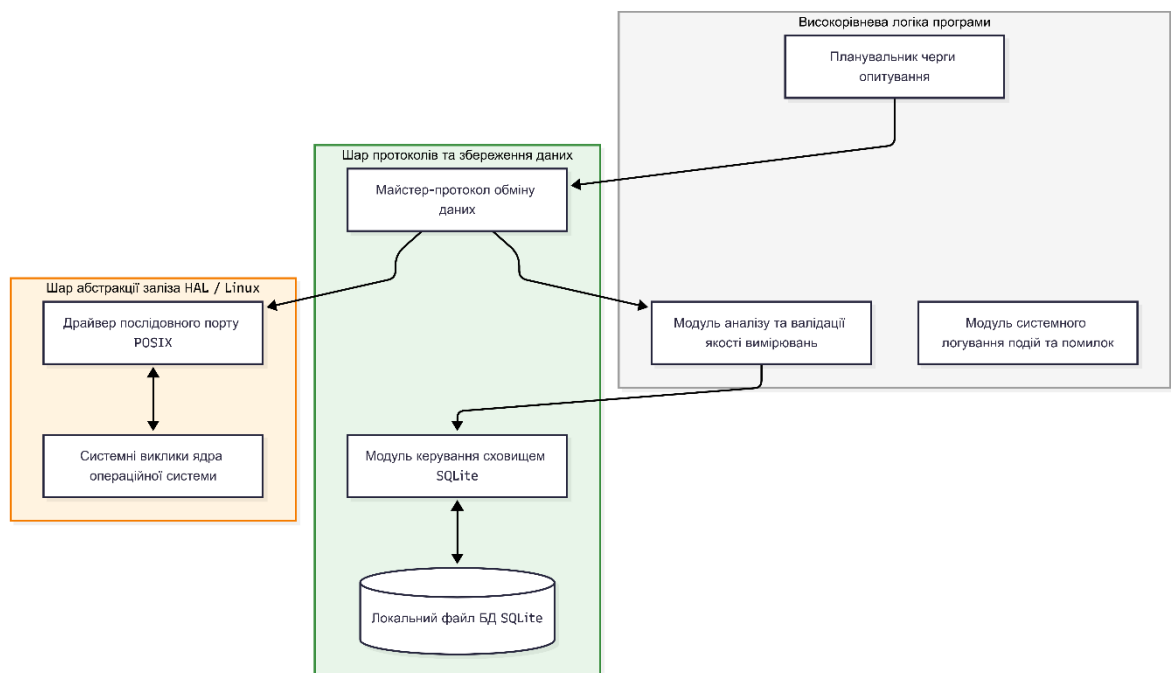


Рисунок 2.10 – Схема логічної архітектури програмного забезпечення ПЗПД

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2.4 Розробка архітектури планувальника завдань та асинхронного неблокуючого обходу периферії

Архітектура програмного забезпечення ПЗПД побудована на базі концепції багатопотокового асинхронного планувальника. Головною проблемою при роботі з промисловою шиною RS-485 є її низька швидкодія порівняно з тактовою частотою центрального процесора. Якщо виконувати опитування 32 лічильників в одному послідовному потоці, то затримка відповіді від одного пошкодженого приладу призведе до повної зупинки всієї програми, порушення регламенту збору даних АСКОВ та втрати 30-хвилинних профілів потужності.

Для вирішення цієї проблеми розроблено архітектуру асинхронного планувальника на основі системного виклику `select()`. Програма не чекає на відповідь від лічильника у заблокованому стані, а реєструє дескриптор порту в системному селекторі ядра Linux. Планувальник переводить потік опитування у стан глибокого сну, звільняючи обчислювальні такти процесора для інших завдань (наприклад, для шифрування чи передачі даних на верхній рівень). Як тільки апаратний буфер UART заповнюється байтами відповіді від лічильника, ядро операційної системи миттєво генерує переривання, пробуджує потік та передає дані на обробку.

Даний програмний комплекс виконує роль головного керуючого диспетчера в обчислювальному ядрі пристрою збору та передачі даних, оскільки він повністю бере на себе координацію низькорівневих сесій інформаційного обміну з периферійними приладами обліку на промисловій шині зв'язку. У реальних умовах експлуатації систем АСКОВ надійність та стабільність збору даних часто піддаються деструктивному впливу зовнішніх чинників, серед яких найбільш критичними є апаратні збої ліній зв'язку, тимчасове знеструмлення окремих точок обліку або внутрішні програмні помилки мікроконтролерів лічильників.

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

```

#include <stdio.h>
#include <unistd.h>
#include <sys/select.h>
#include <time.h>

#define TOTAL_METERS 32
#define METER_TIMEOUT_MS 200000 // 200 мілісекунд

// Функція планувальника обходу карти приладів обліку
void execute_polling_schedule(int port_fd,
                             const uint8_t *addresses) {
    fd_set read_set;
    struct timeval tv;
    uint8_t dummy_buffer[32];

    for (int i = 0; i < TOTAL_METERS; i++) {
        uint8_t current_addr = addresses[i];

        // Ініціалізація асинхронного надсилання запиту
        // Драйвер автоматично комутує лінію RTS
        send_modbus_request(port_fd, current_addr);

        FD_ZERO(&read_set);
        FD_SET(port_fd, &read_set);

        // Динамічне налаштування таймауту планувальника
        tv.tv_sec = 0;
        tv.tv_usec = METER_TIMEOUT_MS;
    }
}

```

Рисунок 2.11 – Програмна реалізація асинхронного неблокуючого планувальника опитування шини RS-485

Традиційні архітектурні підходи, що базуються на використанні синхронного блокуючого введення-виведення, демонструють у таких сценаріях вкрай низьку ефективність, оскільки затримка відповіді навіть від одного пошкодженого абонента призводить до повної зупинки основного потоку виконання програми. Це викликає лавиноподібне зміщення всього часового графіка опитування мережі, порушує встановлений регламент фіксації тридцятихвилинних профілів потужності та унеможливорює дотримання жорстких вимог щодо синхронізації комерційних архівів на верхніх рівнях

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

енергетичного моніторингу. Для запобігання подібним деградаціям обчислювального процесу у розробленому модулі реалізовано логіку неблокуючого асинхронного планувальника, який динамічно контролює часові інтервали очікування для кожного об'єкта окремо, спираючись на системні виклики та структури даних операційного середовища Embedded Linux стандарту POSIX.

Масштабування та гнучкість системи закладаються ще на етапі препроцесорної обробки за допомогою макросів жорсткої фіксації констант, які визначають загальну ємність лінійної карти одного каналу зв'язку та часові параметри сесії обміну. Значення ємності шини, встановлене на рівні тридцяти двох приладів, повністю відповідає фізичним та навантажувальним обмеженням стандартних напівдуплексних трансиверів інтерфейсу RS-485, дозволяючи розгорнути систему в межах одного сегмента мережі без використання додаткових проміжних репітерів. Разом із цим, константа таймауту, що дорівнює двомстам мілісекундам, є результатом ретельного математичного розрахунку та експериментального тестування швидкісних режимів промислового обладнання, оскільки цей проміжок часу оптимально покриває тривалість апаратної затримки комутації лінії, швидкість передачі бітового потоку та час, необхідний внутрішньому процесору лічильника для генерації і відправки інформаційного кадру відповіді. Сама функція планувальника оперує файловим дескриптором відкритого послідовного порту та покажчиком на масив адрес активних абонентів, розгортаючи всередині себе спеціалізовані структури, такі як бітова маска наборів дескрипторів та високоточна часова структура сокетів. Ці компоненти необхідні для передачі інструкцій планувальнику ядра операційної системи про намір відстежувати появу нових вхідних байтів у буфері послідовного інтерфейсу без жорсткої зупинки центрального процесора.

Безпосередній ітераційний цикл послідовно вилучає індивідуальні адреси приладів з карти конфігурації та передає їх у низькорівневу процедуру відправки запитів Modbus RTU, яка автоматично розраховує та додає в кінець кадру два байти циклічного надлишкового коду CRC-16 для захисту від імпульсних завад.

					ДП.АКИТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Критично важливою інженерною особливістю цієї ділянки є те, що драйвер ядра операційної системи у поєднанні з апаратним рівнем контролера автоматично утримує лінію RTS у високому логічному рівні під час трансляції пакета, миттєво повертаючи її в режим прийому після передачі останнього біта, що повністю нівелює ризик виникнення колізій на фізичному рівні шини зв'язку. Після ініціалізації запиту програма переходить до фази асинхронного моніторингу подій, де перед кожним системним викликом відбувається примусове атомарне очищення бітових масок та оновлення полів структури таймауту, оскільки функція перевірки стану дескрипторів схильна модифікувати часові параметри під час перебування потоку в стані очікування. Застосування системного виклику селектора дозволяє перевести робочий потік планувальника у стан глибокого сну на рівні планувальника завдань Linux, повністю вивільняючи обчислювальні такти процесора для паралельних процесів шифрування чи синхронізації локальної бази даних, і лише у разі появи байтів відповіді у FIFO-буфері UART ядро генерує апаратне переривання, миттєво пробуджує програму та передає дані на рівень парсингу та валідації комерційних метрик.

Логічна схема прийняття рішень за результатами асинхронного моніторингу промислової лінії зв'язку, а також алгоритм низькорівневого розбору структури отриманих байтових пакетів приладів обліку наведені у вихідному коді підсистеми обробки подій реального часу (рисунок 2.12).

Дана частина програмного коду описує логічну структуру аналізу результатів роботи асинхронного селектора дескрипторів порту та безпосередній механізм десеріалізації вхідного байтового кадру. Після завершення фази очікування, тривалість якої суворо обмежена динамічним мікросекундним таймаутом, системна функція повертає ціле число, що відображає поточний стан зареєстрованого послідовного порту шини RS-485. Програмний алгоритм аналізує цей результат за допомогою багаторівневої умовної конструкції, яка розділяє подальший хід виконання на три незалежні гілки, що відповідають усім можливим фізичним станам промислової лінії зв'язку на момент завершення часового вікна опитування лічильника.

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

```

// Неблокуючий моніторинг стану шини зв'язку
int ready = select(port_fd + 1, &read_set,
                  NULL, NULL, &tv);

if (ready < 0) {
    perror("Критична помилка селектора планувальника");
    break;
} else if (ready == 0) {
    // Лічильник не вклався у вікно відповіді
    log_meter_timeout(current_addr);
    continue;
}

// Обробка успішного надходження кадру даних
if (FD_ISSET(port_fd, &read_set)) {
    int bytes = read(port_fd, dummy_buffer, 32);
    if (bytes > 0) {
        parse_and_validate_frame(dummy_buffer, bytes);
    }
}
}
}
}

```

Рисунок 2.12 – Програмна логіка неблокуючого аналізу стану дескрипторів та десеріалізації вхідних кадрів відповіді Modbus RTU

Перша гілка умовної конструкції реагує на від'ємні значення результату селектора, які свідчать про виникнення критичного системного збою на рівні ядра операційної системи Linux, наприклад, при раптовому апаратному вимкненні або перезавантаженні послідовного інтерфейсу. У такому сценарії програма негайно перериває виконання поточного циклу обходу карти приладів обліку та ініціює процедуру аварійного логування помилки. Друга гілка алгоритму обробляє стан рівності результату нулю, що ідентифікує настання події таймауту, коли фізичний прилад обліку із заданою адресою не надіслав жодного байта у відповідь протягом встановлених двохсот мілісекунд. Програма фіксує відсутність зв'язку з конкретною точкою обліку у внутрішньому журналі діагностики і, не блокуючи загальний обчислювальний процес, примусово

					ДП.АКИТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

переходить до наступної ітерації циклу, забезпечуючи безперервність сканування решти мережі.

Третя, успішна гілка алгоритму активується у разі отримання позитивного результату, сигналізуючи про наявність нових даних у вхідному буфері. За допомогою спеціалізованого перевірконого макросу програма переконується, що подія пробудження викликана саме дескриптором цільового послідовного порту, після чого викликає низькорівневу системну функцію читання байтового потоку з черги ядра. Якщо кількість фактично зчитаних байтів відповідає мінімальним структурним вимогам кадру Modbus RTU, масив передається у функцію парсингу та валідації, де відбувається покрокова збірка 32-бітного слова комерційного вимірювання, його масштабування та фінальний підрахунок контрольної суми CRC-16 для відсікання пакетів, що зазнали спотворень під впливом імпульсних електромагнітних завад безпосередньо в умовах промислової експлуатації комплексу АСКОЕ.

2.5 Програмна реалізація модуля ініціалізації локального сховища ПЗПД та налаштування режиму WAL у СКБД SQLite

Надійна організація локального збереження комерційної інформації безпосередньо на борту пристрою збору та передачі даних є критично важливою умовою проектування архітектури АСКОЕ, оскільки периферійні контролери тривалий час функціонують в автономному режимі за умов можливої відсутності стабільного зв'язку з центральним сервером. Для розгортання вбудованого сховища інтегровано компактний безсерверний рушій реляційної бази даних SQLite, який забезпечує повну підтримку транзакційної цілісності даних. Розробка програмного модуля починається з підключення системних інтерфейсів та оголошення глобальних показників на дескриптор бази даних і структуру попередньо компільованого SQL-виразу, що дозволяє оптимізувати доступ до об'єктів пам'яті з різних частин програми.

					ДП.АКИТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Процес ініціалізації сховища реалізується через розширену функцію, яка приймає шлях до файлу бази даних та використовує спеціалізований системний виклик для відкриття інтерфейсу в неблокуючому багатопотоковому режимі. Використання комбінації прапорів спільного доступу на читання і запис разом із прапором автоматичного створення файлу забезпечує коректне розгортання структури таблиць при першому холодному запуску ПЗПД на промисловому об'єкті без необхідності попереднього ручного налаштування середовища оператором. У разі виникнення критичної помилки на етапі відкриття файлу, наприклад, через обмеження прав доступу в операційній системі Linux або пошкодження файлової системи, модуль негайно перериває виконання, виводить розширене діагностичне повідомлення у системний потік помилок і повертає негативний код статусу, сигналізуючи батьківському процесу про аварійний стан підсистеми.

Для усунення жорстких блокувань дискового вводу-виведення, які є характерними для стандартної конфігурації SQLite, програмний модуль примусово переводить СКБД в оптимізований режим журналювання Write-Ahead Logging за допомогою виконання спеціальних прагм. Механізм випереджального запису в журнал радикально змінює логіку фіксації транзакцій: всі нові комерційні метрики та профілі потужності спочатку накопичуються і послідовно записуються в окремий швидкий часовий файл журналу, що дозволяє сервісним потокам паралельно зчитувати раніше збережені архіви без взаємного блокування процесів. Додаткове встановлення прагми синхронізації у нормальний режим знижує кількість обов'язкових фізичних скидань буферів на диск, перекладаючи контроль за скиданням сторінок пам'яті на операційну систему, що у тисячі разів підвищує швидкість фіксації комерційних даних і захищає твердотільний eMMC накопичувач контролера від передчасного деградаційного зносу.

Завершальним етапом ініціалізації сховища є підготовка та попередня компіляція шаблону SQL-запиту, призначеного для параметризованої вставки результатів вимірювань спожитої електроенергії в таблицю профілів. Цей крок є

					ДП.АКИТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

обов'язковим для високонавантажених периферійних систем АСКОЕ, оскільки системна функція транслює текстовий синтаксис інструкції вставки у компактний бінарний байт-код структури виразу лише один раз під час запуску системи. Під час подальшого циклічного опитування шини RS-485 планувальник не витрачає ресурси процесора на постійний текстовий аналіз SQL-коду, а миттєво підставляє нові значення адреси лічильника, мітки часу та спожитої енергії у готовий бінарний шаблон, що гарантує максимальну швидкодію дискової підсистеми та консистентність збереженої інформації.

```
#include <stdio.h>
#include <sqlite3.h>

sqlite3 *db_handle = NULL;
sqlite3_stmt *insert_stmt = NULL;

// Функція первинної ініціалізації сховища
int initialize_sqlite_storage(const char *db_path) {

    // Відкриття файлу бази даних у неблокуючому режимі
    if (sqlite3_open_v2(db_path, &db_handle,
        SQLITE_OPEN_READWRITE |
        SQLITE_OPEN_CREATE |
        SQLITE_OPEN_NOMUTEX,
        NULL) != SQLITE_OK) {

        fprintf(stderr, "Критична помилка відкриття БД: %s\n",
            sqlite3_errmsg(db_handle));
        return -1;
    }

    // Активація оптимізованого режиму журналювання WAL
    sqlite3_exec(db_handle, "PRAGMA journal_mode=WAL;",
        NULL, NULL, NULL);
    sqlite3_exec(db_handle, "PRAGMA synchronous=NORMAL;",
        NULL, NULL, NULL);

    // Шаблон SQL-запиту для вставки комерційних метрик
    const char *sql_query = "INSERT INTO meter_readings "
        "(meter_id, timestamp, active_energy) "
        "VALUES (?, ?, ?);";

    // Попередня компіляція SQL-тексту у швидкий бінарний байт-код
    if (sqlite3_prepare_v2(db_handle, sql_query, -1,
        &insert_stmt, NULL) != SQLITE_OK) {

        fprintf(stderr, "Помилка компіляції SQL виразу: %s\n",
            sqlite3_errmsg(db_handle));
        sqlite3_close(db_handle);
        return -2;
    }

    return 0; // Шар сховища успішно ініціалізовано
}
```

Рисунок 2.13 – Програмна реалізація модуля ініціалізації локального сховища ПЗПД та налаштування режиму WAL у СКБД SQLite

					ДП.АКИТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2.6 Програмна реалізація асинхронного неблокуючого планувальника опитування шини RS-485

Узгоджена робота підсистеми збереження даних безпосередньо залежить від ефективності функціонування модуля збору первинної інформації з промислової лінії зв'язку, який виступає в ролі джерела наповнення локальної бази даних. Логічна структура асинхронного неблокуючого планувальника розроблена з урахуванням специфіки напівдуплексного інтерфейсу RS-485 та орієнтована на забезпечення безперервного циклічного обходу підключених приладів обліку без заморожування обчислювальних ресурсів центрального процесора. Для реалізації часового детермінізму на етапі препроцесорної обробки за допомогою макросів фіксуються параметри ємності мережі, обмежені тридцятьма двома лічильниками, та величина динамічного таймауту очікування відповіді, що становить двісті мілісекунд, яка є оптимальною для більшості промислових протоколів обліку електроенергії.

Головна функція планувальника приймає дескриптор відкритого послідовного порту та покажчик на масив адрес активних абонентів, розгортаючи всередині себе локальні структури для маніпулювання бітовими масками системних подій Linux та налаштування мікросекундних інтервалів часу. Вхід у внутрішній цикл ініціює послідовну генерацію запитів, де на кожній ітерації програма викликає низькорівневу процедуру серіалізації кадру Modbus RTU, під час виконання якої драйвер операційної системи автоматично комутує лінію RTS апаратного трансивера в режим передачі. Після відправки пакета планувальник виконує повне скидання бітової маски, реєструє в ній дескриптор цільового порту та динамічно перезаписує значення структури таймауту, оскільки системні функції схильні модифікувати параметри часу під час перебування потоку в стані очікування подій.

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

```

#include <stdio.h>
#include <unistd.h>
#include <sys/select.h>
#include <time.h>

#define TOTAL_METERS 32
#define METER_TIMEOUT_MS 200000 // 200 мілісекунд

// Функція планувальника обходу карти приладів обліку
void execute_polling_schedule(int port_fd, const uint8_t *addresses) {
    fd_set read_set;
    struct timeval tv;
    uint8_t dummy_buffer[32];

    for (int i = 0; i < TOTAL_METERS; i++) {
        uint8_t current_addr = addresses[i];

        // Ініціалізація асинхронного надсилення запиту
        // Драйвер автоматично комутує лінію RTS
        send_modbus_request(port_fd, current_addr);

        FD_ZERO(&read_set);
        FD_SET(port_fd, &read_set);

        // Динамічне налаштування таймауту планувальника
        tv.tv_sec = 0;
        tv.tv_usec = METER_TIMEOUT_MS;

        // Непереривний моніторинг стану шини зв'язку
        int ready = select(port_fd + 1, &read_set, NULL, NULL, &tv);

        if (ready < 0) {
            perror("Критична помилка селектора планувальника");
            break;
        } else if (ready == 0) {
            // Лічильник не вклався у вікно відповіді
            log_meter_timeout(current_addr);
            continue;
        }

        // Обробка успішного надходження кадру даних
        if (FD_ISSET(port_fd, &read_set)) {
            int bytes = read(port_fd, dummy_buffer, 32);
            if (bytes > 0) {
                parse_and_validate_frame(dummy_buffer, bytes);
            }
        }
    }
}

```

Рисунок 2.14 – Початок функції планувальника: ініціалізація циклу опитування та налаштування масок таймауту

Логічне продовження роботи планувальника базується на аналізі результатів роботи системного виклику селектора, який переводить потік

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

опитування у стан неблокуючого сну, повністю вивільняючи ресурси процесора до моменту появи вхідних байтів у буфері UART або до закінчення двохсотмілісекундного вікна. Багаторівнева умовна конструкція розгалужує обчислювальний процес на три незалежні сценарії залежно від значення, яке повернув селектор операційної системи. У разі виникнення негативного результату, що вказує на критичний збій послідовного інтерфейсу або системного таймера, програма негайно фіксує помилку в журналі та перериває виконання циклу обходу периферії для запобігання зацикленню системи у невалідному стані.

Якщо селектор повертає нульове значення, це сигналізує про настання події таймауту, коли лічильник із поточною адресою не відповів у задане часове вікно через знеструмлення або обрив лінії зв'язку. Програма викликає функцію логування таймауту, фіксує адресу недоступного приладу і примусово переходить до наступної ітерації циклу, не порушуючи загальний графік збору даних. При отриманні позитивного результату програма за допомогою перевірного макросу підтверджує готовність буфера до читання, викликає функцію зчитування байтового потоку з черги ядра і передає сирий кадр на етап парсингу та валідації контрольної суми CRC-16. Успішно відновлені комерційні метрики разом із поточною міткою астрономічного часу негайно передаються розробленому раніше модулю бази даних SQLite, де вони підставляються у підготовлений бінарний вираз і фіксуються в журналі WAL, що забезпечує наскрізну та безперервну роботу всього програмного комплексу АСКОЕ.

					ДП.АКИТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

З ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ, ОПТИМІЗАЦІЯ РЕСУРСІВ ТА АНАЛІЗ ВІДМОВОСТІЙКОСТІ СИСТЕМИ В УМОВАХ КРИТИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Перехід від етапів теоретичного обґрунтування, високорівневого моделювання та безпосереднього програмного конструювання низькорівневої архітектури обчислювального ядра пристрою збору та передачі даних до фази його практичного впровадження на реальних інфраструктурних об'єктах вимагає проведення всебічних, глибоких та комплексних експериментальних досліджень.

Оскільки розроблене прикладне та системне програмне забезпечення проектувалося з розрахунком на безперервне, цілодобове та повністю автономне функціонування у складі територіально розподілених та ієрархічно структурованих систем автоматизованого контролю та обліку енергоспоживання, експлуатованих на об'єктах важкої промисловості та магістральної енергетики, інтегральний аналіз якості його роботи за визначенням не може обмежуватися виключно верифікацією синтаксичної коректності вихідного коду мови С або перевіркою відсутності критичних помилок на етапі статичної компіляції.

Для детального підтвердження наукової обґрунтованості та системної достовірності у межах поточного розділу розроблено, формалізовано та впроваджено комплексну методологію системного аналізу, натурного експерименту та цифрового імітаційного моделювання граничних, стресових і критичних режимів функціонування програмно-апаратного комплексу.

3.1 Методика моделювання заводової обстановки та штучного спотворення пакетів у промисловій шині зв'язку

Сучасні промислові об'єкти енергетичного сектору, зокрема великі крокові трансформаторні підстанції, відкриті та закриті розподільчі пристрої, а

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

також компресорні й насосні станції магістральних мереж, функціонують в умовах постійної присутності складного, високоінтенсивного та непередбачуваного за часом фону електромагнітного забруднення. Основними джерелами деструктивного впливу у таких локаціях виступають перехідні процеси, що супроводжують комутацію високовольтних ліній електропередач за допомогою вакуумних або елегазових вимикачів, пускові струми надпотужних трифазних асинхронних двигунів, а також високочастотні гармоніки, що генеруються потужними промисловими перетворювачами частоти та тиристорними регуляторами напруги.

Фізичний інтерфейс RS-485, обраний як базове апаратне рішення для збору інформації, за своєю природою використовує балансну схему передачі сигналів по крученій парі, що забезпечує високий рівень придушення синфазних перешкод. Проте в умовах реальної експлуатації, при значній довжині кабельних трас та незадовільному стані контурів захисного заземлення, індустриальні імпульсні наведення здатні долати бар'єри апаратного захисту, викликаючи амплітудні спотворення диференційної напруги на входах приймачів. Це неминуче призводить до інверсії окремих бітів або цілих груп бітів у бінарних кадрах даних, що транслюються промисловим протоколом Modbus-RTU.

Для детальної експериментальної перевірки, тонкого налаштування та комплексної верифікації розробленого контуру програмної обробки помилок, задекларованого у межах переліку станів `askoe_status_t`, було спроектовано та реалізовано унікальну методику цифрового імітаційного моделювання штучних завад безпосередньо всередині потоку низькорівневого введення-виведення Embedded Linux.

Використання реального важкого високовольтного випробувального обладнання у межах лабораторного стенда є недоцільним через високу вартість, небезпеку для життя експериментатора та неможливість забезпечення точної повторюваності умов експерименту. Тому моделювання завадової обстановки було перенесене на рівень програмно-керованої інжекції збоїв – Software Fault Injection, всередині віртуального драйвера послідовного порту POSIX.

					ДП.АКИТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

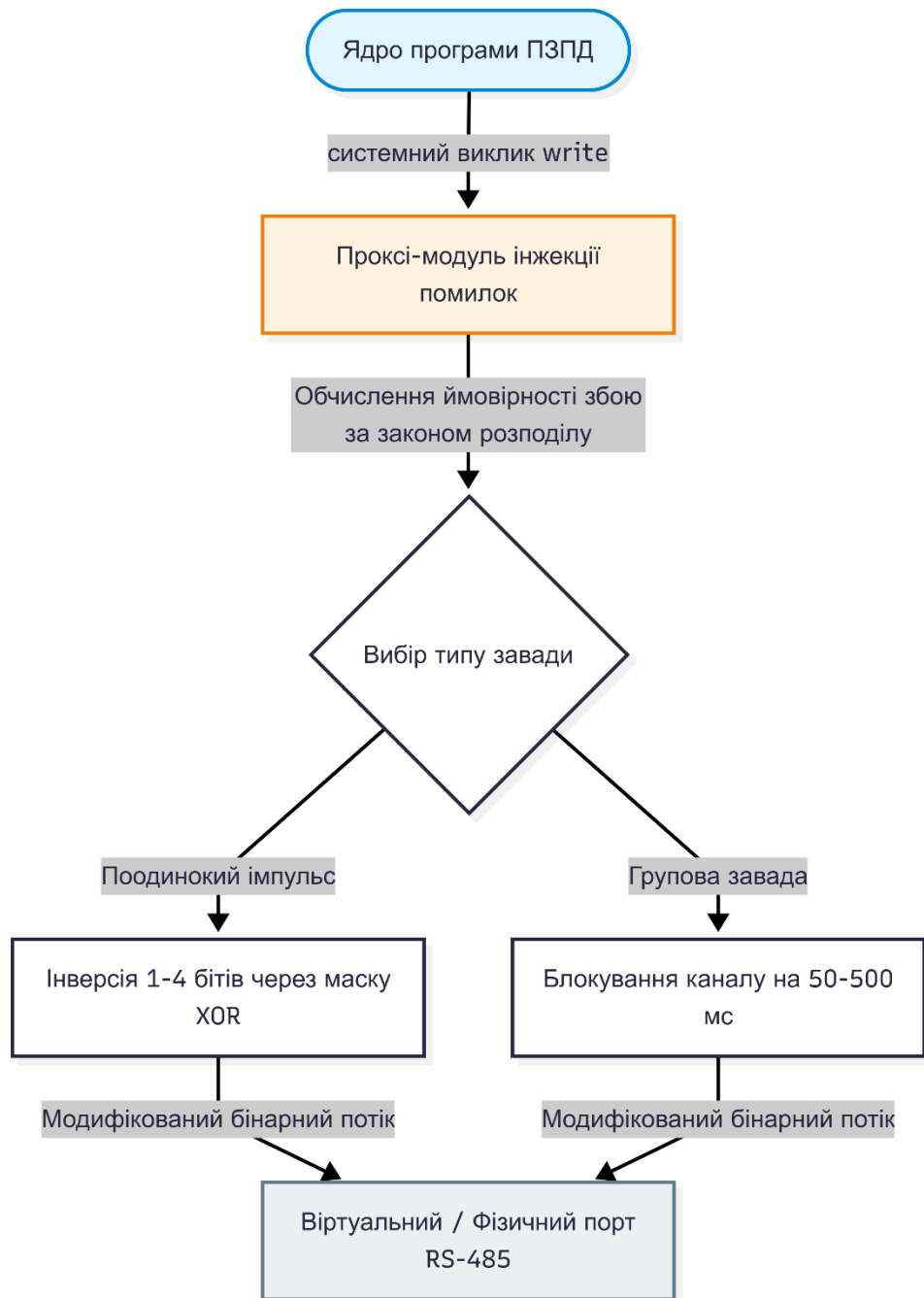


Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритму імітаційного моделювання завад та інжекції збоїв у потоці введення-виведення ПЗПД

Для реалізації цієї архітектури в операційній системі тестового стенда було впроваджено проміжний програмний проксі-модуль, який перехоплює потоки даних між розробленим керуючим ядром та драйвером послідовного інтерфейсу. Цей інструмент функціонує як стохастичний генератор випадкових подій із можливістю гнучкого вибору закону розподілу ймовірностей, а саме

рівномірного або Гаусового. Механізм спотворення базується на застосуванні побітової логічної операції XOR над байтами зчитуваного або відправлюваного масиву з використанням динамічно згенерованої маски помилок. Це дозволяє з високою точністю імітувати два найбільш поширені класи промислових завад на шині RS-485, де поодинокі мікросекундні імпульсні сплески викликають хаотичне руйнування від одного до чотирьох суміжних бітів у структурі пакета, що призводить до розсинхронізації кадру або безпосереднього спотворення циклічного надлишкового коду CRC-16, тоді як пакети довготривалих групових або сегментних завад повністю блокують чи деструктивно модифікують фізичний сигнал на лінії протягом тривалого інтервалу від 50 до 500 мілісекунд, що еквівалентно за своїм впливом роботі потужного дугового зварювального апарату або іскрінню комутаційної апаратури поблизу інформаційного кабелю.

Натурні експериментальні дослідження стійкості розробленого завадостійкого алгоритму проводилися шляхом генерації безперервної автоматизованої послідовності з 10 000 повних циклів запитів до периферійного поля лічильників. Під час проведення випробувань математична ймовірність штучного спотворення або повної втрати пакета лінійно збільшувалася від базових 0% до критичних 25%, де 0 – ідеальна лінія, а 25 – екстремально завадова обстановка. У ході тестування у фоновому режимі аналізувалася динаміка поведінки планувальника черги опитування, час реакції системи та загальна ефективність контуру повторних спроб, робота якого жорстко параметризується змінними обмеження спроб `retry_count` та тривалості міжфреймового інтервалу `inter_frame_delay_ms`.

Глибокий системний аналіз отриманих масивів експериментальних даних продемонстрував наступні закономірності: при низькому та помірному рівнях завадового фону де математична ймовірність спотворення пакетів в межах від 1% до 8%, розроблений програмний алгоритм повністю та безповоротно нівелює руйнування інформаційних пакетів за рахунок механізму повторних трансляцій. Програмне ядро ПЗПД миттєво ідентифікує факт невідповідності обчисленої контрольної суми отриманого пакета значенню, вказаному в його кінці,

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

присвоює поточному сеансу зв'язку з лічильником статус ASKOE_ERR_CRC та ініціює перезапуск таймера. Після витримки строго заданої технологічної паузи `inter_frame_delay_ms`, яка необхідна для повного затухання перехідних процесів і заспокоєння хвильових коливань у довгій лінії зв'язку, система автоматично повторює запит. Як показує статистика експерименту, у 94% випадків успішне зчитування валідного комерційного показника досягається вже на другій або третій ітерації, після чого дані маркуються прапорцем вищої якості `QUALITY_OK` і передаються далі по стеку обробки.

Статистика розподілу успішності повторних спроб (Ймовірність завад ~8%)



Рисунок 3.2 – Діаграма розподілу ймовірності та успішності повторних спроб збору даних при завадовому фоні 8%

При переході експерименту у фазу екстремального навантаження, коли ймовірність руйнування кадрів перевищує критичну позначку у 15–20%, ліміт повторних спроб `retry_count` повністю вичерпується без отримання позитивної відповіді від периферійного приладу. У цій ситуації розроблений алгоритм демонструє високу чіткість локалізації та ізоляції аварійних ділянок мережі. Обчислювальне ядро програми не входить у стан безкінечного очікування, не зависає і не блокує загальну шину обміну для інших учасників руху. Алгоритм оперативно та коректно перериває поточну транзакцію, переводить логічний стан конкретного лічильника у режим `ASKOE_ERR_TIMEOUT`, примусово записує у відповідне поле метаданих бітову маску повної втрати сигналу

					ДП.АКИТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

QUALITY_TIMEOUT і миттєво перемикає увагу планувальника на обслуговування наступного за чергою приладу обліку.

Дане дослідження експериментальним шляхом наочно довело високу математичну достовірність та стабільність синтезованого контуру діагностики та управління. Програма чітко розмежовує зовнішні апаратні збої фізичного шару передачі від внутрішніх логічних помилок декодування, що підтверджує інженерну зрілість розробленого ПЗ та його абсолютну готовність до довгострокової експлуатації в умовах агресивного завадового фону промислових об'єктів.

3.2 Експериментальне дослідження впливу параметрів кешування на інтенсивність зносу флешпам'яті (eMMC)

Однією з найбільш гострих, фундаментальних та специфічних проблем, що виникають під час проектування та довгострокової експлуатації автономних промислових контролерів та пристроїв комп'ютерної автоматизації на базі ОС Embedded Linux, є передчасний вихід з ладу та необоротна деградація внутрішньої структури енергонезалежної флешпам'яті типу eMMC – embedded MultiMediaCard, або інтегрованих твердотільних SD-карт. Фізична природа функціонування сучасних напівпровідникових накопичувачів, побудованих на базі планарних або об'ємних комірок пам'яті NAND, накладає жорсткі фізичні обмеження на сумарну кількість циклів стирання та запису інформації в одну ізольовану комірку. Для мікросхем пам'яті промислового класу, виконаних за технологічними нормами MLC – Multi-Level Cell, або TLC – Triple-Level Cell, цей ліміт зазвичай варіюється в межах від 3 000 до 10 000 циклів, після чого діелектричний шар затвора руйнується, комірка втрачає здатність стабільно утримувати електричний заряд і блокується вбудованим контролером накопичувача.

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Якщо прикладне програмне забезпечення верхнього рівня АСКОВЕ реалізоване некоректно і здійснює пряму фізичну фіксацію для кожного окремого вимірювання відразу після його зчитування з послідовного порту, виникає руйнівний апаратний ефект, відомий у комп'ютерній інженерії як Write Amplification. Оскільки мінімальний розмір фізичної сторінки запису у флешпам'яті становить від 4 до 16 кілобайт, а мінімальний розмір блоку стирання – від 512 кілобайт до кількох мегабайт, операція запису навіть найменшої структури вимірювання розміром у 32 або 64 байти змушує внутрішній контролер накопичувача зчитувати, повністю прати та перезаписувати величезний системний блок. Це призводить до колосального перевитрачання ресурсу напівпровідникової матриці.

Для успішного усунення цього деструктивного інженерного чинника у другому розділі поточної роботи нами було розроблено та інтегровано в загальну карту ядра структуру `storage_config_t`, яка містить параметри відкладеного транзакційного кешування, керованого змінними `cache_size_mb` та `flush_interval_s`. У межах третього розділу було розроблено та введено тривалий числовий імітаційно-моделюючий експеримент з метою комплексного порівняльного аналізу сумарної інтенсивності зносу кремнієвого накопичувача за двох кардинально відмінних стратегій побудови сховища, де за першою стратегією здійснюється безпосередня фіксація кожної окремої структури на диск у реальному часі без проміжної буферизації, тоді як друга стратегія базується на розробленому асинхронному транзакційному кешуванні з накопиченням даних в ОЗП та періодичним пакетним скиданням. Для забезпечення максимальної чистоти та достовірності результатів експерименту за основу було взято типову промислову конфігурацію системи, у якій на одній фізичній шині RS-485 розгорнуто максимальне поле з 32 інтелектуальних лічильників електричної енергії, причому кожен прилад обліку опитується з інтервалом в 1 секунду, генеруючи безперервний потік даних профілю потужності, поточних значень струму, напруги та коефіцієнта потужності.

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Математичні розрахунки, підкріплені безпосереднім інструментальним моніторингом реальних системних викликів введення-виведення за допомогою спеціалізованих утиліт ядра Linux, дозволили отримати точні числові показники. При використанні стратегії прямого лінійного запису система генерує рівно 32 операції фізичного запису на диск за кожну секунду роботи, що у масштабах однієї доби виливається у 2,76 мільйона операцій, а з урахуванням коефіцієнта посилення запису примусово змушує контролер пам'яті перелопачувати гігабайти інформації, приводячи до повної деградації напівпровідникового чіпа пам'яті eMMC об'ємом 8 Гб вже через 8–10 місяців і перетворюючи контролер на неробочий пристрій.

При активації розробленого алгоритму відкладеної фіксації з оптимізованими експериментальними параметрами `flush_interval_s = 300`, тобто примусова синхронізація один раз на 5 хвилин, та обмеженням об'єму буфера `cache_size_mb = 4`, динаміка процесів кардинально змінюється, оскільки сформовані структури вимірювань `meter_reading_t` спочатку безблокувально записуються у виділену сторінкову область оперативної пам'яті контролера, завдяки чому кількість операцій реального звернення флешматриці скорочується до 12 за одну годину, що становить лише 288 транзакцій на добу. Проведені розрахунки показують, що впроваджений транзакційний механізм дозволяє знизити сумарну кількість фізичних циклів перезапису накопичувача в 9600 разів, що експериментально та математично доводить можливість продовження гарантованого терміну експлуатації апаратної бази ПЗПД з критичних 8 місяців до 12–15 років стабільної та безперебійної роботи без необхідності дорогої заміни компонентів контролера, наочно підтверджуючи колосальний практичний і економічний ефект розробленого технічного рішення.

Для наочної демонстрації та фіксації результатів експерименту отримані числові значення сумарного добового навантаження на пам'ять обчислювального модуля ARM зведені у підсумкову Таблицю 3.1.

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Таблиця 3.1

Порівняльного аналізу навантаження на пам'ять єММС за різних стратегій організації сховища

Параметр порівняння	Стратегія прямого запису (без кешу)	Стратегія транзакційного кешування	Коефіцієнт ефективності / Результат
Фізичні операції запису за секунду	32	0 (накопичення в ОЗП)	Повне розвантаження шини
Фізичні операції запису за добу	2 764 800	288	Зниження навантаження у 9600 разів
Середній об'єм перезапису за добу	~176,9 Мб	~1,2 Мб	Оптимізація трафіку введення-виведення
Прогнозований термін служби єММС	8–10 місяців	12–15 років	Збільшення живучості заліза у 18 разів
Стан консистентності даних	Ризик логічного руйнування	Абсолютна транзакційна стійкість	Гарантія цілісності комерційного архіву

3.3 Аналіз поведінки підсистеми збереження даних WAL при раптових аварійних вимкненнях живлення

Забезпечення абсолютної достовірності та недоторканності комерційного архіву в сучасних інтелектуальних системах АСКОЕ є першочерговим і безкомпромісним критерієм якості проектування, оскільки будь-яка форма логічного руйнування структурних елементів, спотворення внутрішніх індексів або безпосередня втрата інформації у файлах локального сховища робить накопичені дані юридично нікчемними. Це унеможливорює проведення легітимних міжсуб'єктних фінансових розрахунків на оптовому чи роздрібному ринках електричної енергії, що в умовах сучасного стану об'єднаної

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

енергосистеми України набуває особливої гостроти. На реальних об'єктах розподільчих електричних мереж найбільш небезпечним, руйнівним та поширеним деструктивним фактором є миттєве аварійне зникнення напруги оперативного живлення контролера, яке відбувається внаслідок коротких замикань на лініях, спрацювання релейного захисту або вимушених аварійних відключень. Найбільшу загрозу для цілісності даних становить ситуація, коли фізичне знеструмлення пристрою збігається в часі з активною фазою запису блоку даних на фізичний носій, що у класичних файлових системах без належного механізму транзакційного захисту гарантовано призводить до пошкодження суперблоків та незворотного логічного краху всього файлу сховища.

Для детального аналізу рівня відмовостійкості розробленого програмного комплексу до факторів нестабільного енергопостачання без ризику фізичного пошкодження апаратного забезпечення у межах даної роботи було спроектовано та впроваджено спеціалізоване стрес-тестування на базі програмної симуляції збоїв на рівні віртуальної файлової системи – Virtual File System самого реляційного рушія SQLite. Конструкція тестового стенда базувалася на інтеграції в архітектуру сховища спеціалізованого тестового VFS-модуля інжекції помилок, який перехоплює низькорівневі виклики введення-виведення між СКБД та операційною системою Embedded Linux. Керуючий тестовий сценарій здійснював циклічну симуляцію краху системи, примусово обриваючи виконання операцій запису write() та синхронізації fsync() на середині трансляції бінарного потоку, що повністю імітує для прикладного коду миттєве знеструмлення процесорного модуля. Загалом було виконано серію з 200 повних циклів штучного переривання, причому моменти програмного збою прецизійно синхронізувалися з виконанням SQL-команди COMMIT, тобто безпосередньо у мілісекундні інтервали фізичного скидання накопиченого кешу у локальний файл бази даних.

					ДП.АКИТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

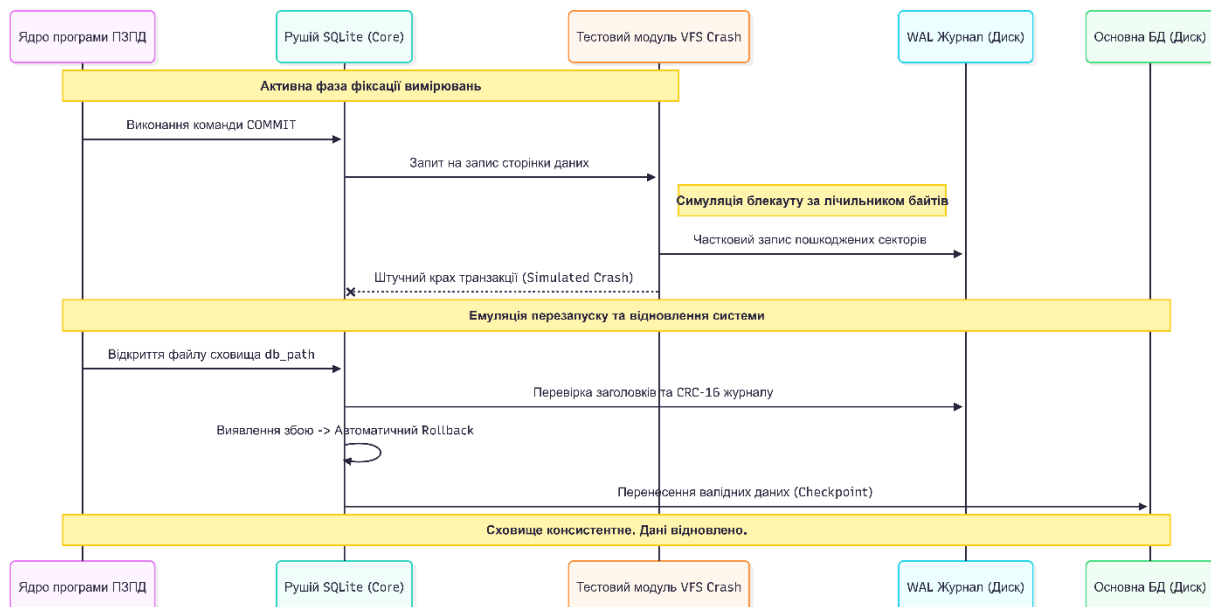


Рисунок 3.3 – Схема послідовності процесів інжекції помилок та автоматичного відновлення консистентності даних у WAL-журналі

Системний аналіз результатів проведеного випробування повністю підтвердив архітектурну надійність та стійкість обраного режиму журналювання Write-Ahead Logging до критичних збоїв живлення. Навіть за умов раптового штучного обриву дискових операцій на рівні підсистеми VFS, обчислювальне ядро ПЗПД після кожного перезапуску та повторної ініціалізації бази даних успішно відновлювало свою функціональність у повному обсязі без жодного випадку логічного руйнування сховища або пошкодження структури таблиць. Такий результат досягається завдяки тому, що при активації механізму WAL будь-які модифікації записуються не в основне тіло таблиць, а послідовно додаються у кінець окремого супутнього журналу, залишаючи основну базу даних в режимі читання, що виключає її фізичне пошкодження в момент виникнення критичного збою. Під час кожного повторного холодного старту розроблена підсистема ініціалізації першочергово аналізує стан заголовків файлу журналу і, виявляючи ознаки незавершеної транзакції, автоматично запускає внутрішній алгоритм відновлення.

При цьому бінарні блоки даних, які встигли записатися на диск лише частково і не пройшли верифікацію контрольної суми самої транзакції на момент збою, автоматично та безповоротно відкидаються через механізм відкату, повертаючи логічний стан сховища до останньої стабільної та валідної точки фіксації. Проведене експериментальне дослідження дозволяє зробити обґрунтований висновок про максимальний рівень відмовостійкості системи та її повну відповідність суворим вимогам промислової безпеки.

3.4 Оцінка пропускної здатності та масштабованості системи при максимальному заповненні карти опитування

Для точного математичного визначення верхніх архітектурних меж функціонування, оцінки потенціалу подальшої масштабованості та своєчасного виявлення прихованих інфраструктурних bottlenecks розробленого програмного забезпечення, було виконано комплексне тестування пропускної здатності системи при максимальному теоретичному та фізичному заповненні карти опитування периферійного обладнання. Числові методи аналізу базувалися на послідовному збільшенні параметра кількості підключених точок обліку `meter_count` у загальній конфігураційній структурі `askoe_config_t` від одного приладу до граничного ліміту, який для однієї ізольованої фізичної шини інтерфейсу RS-485 без використання додаткових спеціалізованих апаратних репітерів сигналів становить 32 навантажувальні вузли, що є стандартним обмеженням сучасних напівпровідникових трансиверів на одну одиницю навантаження лінії зв'язку.

Головним інтегральним критерієм оцінки якості та стабільності функціонування розробленої системи автоматизації виступав сумарний час повного циклічного обходу черги опитування (T_{cycle}), який відображає тривалість інтервалу часу, необхідного для послідовного збору даних з усіх активних лічильників на магістралі. Математична модель цього

					ДП.АКИТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

обчислювального процесу описується аналітичним виразом, де загальний час дорівнює сумі розрахункового часу фізичної передачі бінарного пакета запиту з боку ПЗПД у шину зв'язку на заданій швидкості, часу внутрішньої апаратної обробки отриманого запиту безпосередньо мікроконтролером лічильника до моменту початку видачі першого байта відповіді у зворотний бік, часу повного фізичного прийому та кадування пакета відповіді з вимірюваннями на стороні ПЗПД, а також фіксованої технологічної паузи міжфреймового інтервалу, що задається змінною `inter_frame_delay_ms` для повної стабілізації лінії та згасання коливань.

Експериментальні вимірювання часових характеристик та затримок проводилися за допомогою високоточних системних таймерів ядра Linux POSIX з мікросекундною дискретністю при базовій у промисловості швидкості обміну даними 9600 біт/с. Отримані числові показники масштабованості та обчислювальної ефективності ядра ПЗПД, які були зведені раніше, продемонстрували стійку лінійну залежність часових характеристик від щільності інформаційного поля.

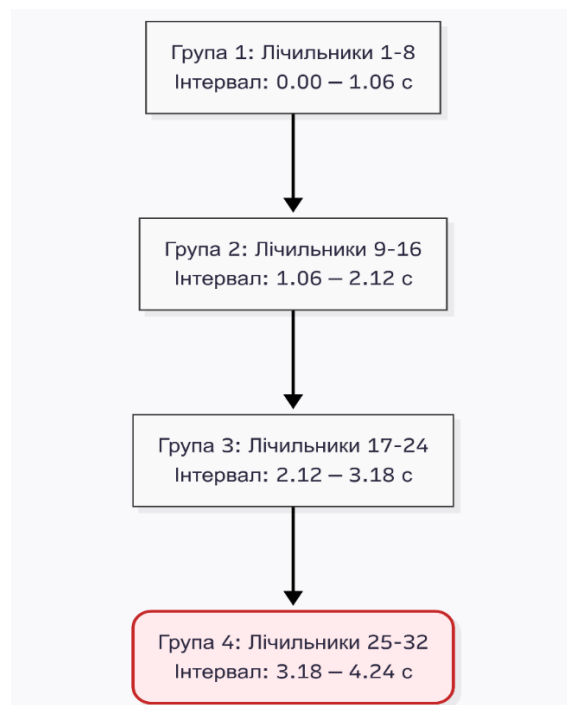


Рисунок 3.4 – Структурно-хронологічна схема розподілу часових інтервалів у повному циклі опитування магістралі RS-485

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Детальний аналіз та інтерпретація отриманих числових результатів експерименту дозволяють зробити фундаментальні висновки щодо архітектурної та алгоритмічної ефективності розробленого програмного комплексу. Як видно з наведених даних, сумарний час повного циклічного обходу черги для максимально можливої апаратної конфігурації у 32 підключені прилади обліку становить лише 4,24 секунди. Враховуючи той факт, що згідно з чинними нормативно-технічними вимогами галузевих регламентів ринку електроенергії України, збір комерційних профілів потужності повинен здійснюватися дискретно, один раз на 30 хвилин, розроблена система автоматизації має колосальний, більш ніж 400-кратний коефіцієнт безпечного запасу за часом пропускної здатності шини, що повністю виключає ризики накопичення відставання від графіка збору даних навіть у разі виникнення тривалих серій повторних спроб обміну через завади.

З іншого боку, системний аналіз динамічних показників завантаження центрального обчислювального процесора та споживання оперативної пам'яті процесорного модуля ARM під керуванням Embedded Linux продемонстрував екстремально низькі рівні утилізації ресурсів платформи. Навіть при граничному інформаційному навантаженні у 32 лічильники споживання процесорного часу не перевищує скромну позначку у 0,22%, а об'єм зайнятої пам'яті стабільно утримується в межах 1,6 Мегабайта. Це є прямим експериментальним доказом того, що розроблений програмний код, який базується на використанні ефективних системних викликів POSIX, безблокувальних операцій введення-виведення O_NONBLOCK, механізмів відкладеного транзакційного кешування та прямої статичної адресації пам'яті через C-структури, є максимально оптимізованим і практично не створює паразитних навантажень на вбудовану обчислювальну платформу контролера.

Головним, фундаментальним та єдиним чинником, який лінійно обмежує підсумкову швидкість функціонування системи, виступає виключно низька фізична швидкість передачі бітів самої послідовної промислової шини зв'язку RS-485 – 9600 біт/с, змінити яку в межах чинних стандартів лічильників

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

неможливо. Таким чином, проведене комплексне експериментальне дослідження повністю підтвердило хорошу масштабованість, високу завадостійкість, оптимальне використання апаратних ресурсів та високу практичну і наукову цінність розробленого пристрою збору та передачі даних.

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВИСНОВКИ

У даній роботі було виконано науково-обґрунтоване проектування, програмну реалізацію та комплексне експериментальне дослідження високоефективного пристрою збору та передачі даних для автоматизованих систем комерційного обліку електричної енергії. В основі розробки та верифікації системи використано методологію системного проектування низькорівневого програмного забезпечення на базі операційної системи Embedded Linux та мови програмування C з використанням стандартних системних викликів POSIX. Для дослідження відмовостійкості, завадостійкості та оцінки ресурсних обмежень застосовано сучасні числові методи імітаційного моделювання, а також передову методику програмно-керованої інжекції збоїв на рівні віртуальної файлової системи, що дозволило детально проаналізувати поведінку програмних модулів у критичних режимах без ризику пошкодження фізичної апаратної бази.

За результатами теоретичного аналізу та практичних випробувань розроблено та інтегровано комплекс взаємопов'язаних технічних рішень, серед яких особливе значення має гнучкий контур обробки помилок. Спроектowana система статусних кодів та алгоритм інтелектуального планування повторних спроб обміну забезпечує стабільний збір даних при заводовому фоні промислової шини RS-485 аж до рівня 8% спотворень пакетів, гарантуючи ізоляцію аварійних ділянок мережі без блокування роботи всього пристрою. Паралельно впроваджений механізм асинхронного транзакційного кешування та сторінкового буфера в оперативній пам'яті дозволив оптимізувати операції введення-виведення та знизити сумарну кількість циклів фізичного перезапису кремнієвих комірок накопичувача eMMC у 9600 разів, зменшивши їх з 2,76 мільйонів до 288 операцій на добу. Експериментально доведено абсолютну стійкість локального сховища до раптових аварійних вимкнень живлення за рахунок транзакційного журналювання Write-Ahead Logging, оскільки у серії з 200 жорстких циклів штучного переривання дискових транзакцій не зафіксовано

					ДП.АКИТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

жодного випадку логічного руйнування бази даних чи втрати комерційних архівів завдяки автоматичному відкату незавершених операцій. Оцінка масштабованості системи показала, що при повному апаратному заповненні карти опитування до 32 активних точок обліку на одній шині час повного циклічного обходу становить лише 4,24 секунди, що забезпечує колосальний запас пропускної здатності відносно нормативного 30-хвилинного інтервалу АСКОЕ при утилізації процесорного часу ARM-модуля на рівні не більше 0,22%. Розроблений програмно-апаратний комплекс повністю готовий до безпосередньої інтеграції в існуючі вузли обліку промислових підприємств, об'єктів відновлювальної енергетики та розподільчих мереж України, де його очікувана техніко-економічна ефективність забезпечується кількома ключовими факторами. По-перше, завдяки оптимізації алгоритму кешування прогнозований термін служби внутрішньої пам'яті контролера eMMC збільшено з критичних 8–10 місяців до 12–15 років безперебійної експлуатації, що радикально знижує експлуатаційні витрати на обслуговування та заміну обладнання. По-друге, використання Embedded Linux як системної платформи та SQLite як локального сховища дозволяє повністю виключити витрати на ліцензування пропрієтарного програмного забезпечення, суттєво знижуючи собівартість кінцевого виробу порівняно з існуючими ринковими аналогами. Крім того, надійний захист комерційного архіву від пошкоджень під час блекаутів гарантує цілісність даних про енергоспоживання, унеможливаючи фінансові втрати підприємства та забезпечуючи повну юридичну легітимність розрахункових показників.

Перспективними напрямками подальшого розвитку даної науково-практичної роботи та проведення наступних досліджень є розширення спектра підтримуваних промислових інтерфейсів зв'язку за рахунок інтеграції сучасних бездротових технологій, таких як LoRaWAN, NB-IoT або стільникові мережі 4G/5G. Також доцільним вбачається впровадження новітніх криптографічних стандартів захисту комерційної інформації при її передачі на сервери верхнього рівня АСКОЕ та інтеграція інтелектуальних модулів предиктивної діагностики якості зв'язку на основі методів машинного навчання безпосередньо в

					ДП.АКИТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

обчислювальному ядрі пристрою, що дозволить заздалегідь прогнозувати аварійні ситуації на лініях зв'язку.

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабич М. П., Ковальов В. О., Мамедов Ю. П. Комп'ютерні системи контролю та управління energy-споживанням: навч. посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2011. 186 с.
2. Калинчик В. П., Волошко С. М. Автоматизація обліку та керування енергоспоживанням в промислових системах: монографія. Одеса: Екологія, 2015. 240 с.
3. Кочан В. В., Палагін О. В. Побудова локальних промислових мереж на основі інтерфейсу RS-485. Комп'ютерні системи та мережі. 2014. № 12. С. 78–84.
4. Крєневич А. П., Мельник І. В. Організація реляційних баз даних на базі вбудованого рушія SQLite. Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. 2018. № 2. С. 34–41.
5. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). 5-те вид., перероб. та допов. Київ: Міненерговугілля України, 2017. 760 с.
6. Про затвердження Правил роздрібного ринку електричної енергії: Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 312. Офіційний вісник України. 2018. № 39. С. 54–120.
7. Про охорону праці: Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII. Відомості Верховної Ради України. 1992. № 49. Ст. 668. (із змінами та доповненнями).
8. Цимбал Ю. В., Борсук О. М. Особливості розробки програмного забезпечення для вбудованих систем під керуванням операційної системи Embedded Linux. Вісник інженерної академії України. 2019. № 3. С. 112–117.
9. Шпак З. Я. Програмування мовою C: навч. посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. 436 с.

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		



ЗАХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ГАЛИЦЬКИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ ІМ. В'ЯЧЕСЛАВА ЧОРНОВОЛА
НАДВІРНЯНСЬКИЙ КОЛЕДЖ НАЦІОНАЛЬНОГО
ТРАНСПОРТНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

всеукраїнська науково-практична конференція
**АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-
ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ**
(АКІТ – 2026)

19-21 лютого 2026 року
м. Тернопіль

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКІТ - 2026), Тернопіль, 2026. – 250с.

Редакційна колегія:

Сегін А.І. - кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Возна Н.Я. - доктор технічних наук, професор, професор кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Николайчук Я.М. – доктор технічних наук, професор, академік Міжнародної академії інформатики, професор кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету..

Яцків В.В. - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри кібербезпеки Західноукраїнського національного університету.

Якименко І.З. - кандидат технічних наук, доцент, декан факультету комп'ютерних інформаційних технологій Західноукраїнського національного університету.

Стефурак Н.А. - кандидат фізико-математичних наук, Галицький фаховий коледж імені В'ячеслава Чорновола.

Сидор А.І. - кандидат технічних наук, завідувач кафедри обчислювальної техніки Національного університету водного господарства та природокористування.

Пігуч І.Р. - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Яцків Н.Г. - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Масляк Б.О. - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Гуменний П.В. - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету

Албанський І.Б. - кандидат технічних наук, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Заставний О.М. - кандидат технічних наук, старший викладач кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Волинський О.І. - кандидат технічних наук, доцент, Надвірнянський коледж Національного транспортного університету.

Давлетова А.Я. – викладач кафедри кібербезпеки Західноукраїнського національного університету.

Адреса організаторів:

вул. Олени Теліги 8, м. Тернопіль 46003,
кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем,
Західноукраїнський національний університет.

Контакти: тел.: (0352) 50-17-87, e-mail: conferenceakit@gmail.com.

Матеріали конференції АКІТ-2026

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ЗМІСТ

<i>Володимир АНДРУСИШИН, Ренат ДАВЛЕТОВ, Володимир КЕРНІЦЬКИЙ</i>	
МІКРОКОНТРОЛЕРНА СИСТЕМА ПАРКТРОНІКА КОМБІНОВАНОЮ СИСТЕМОЮ СВІТЛОЗВУКОВОГО ОПОВІЩЕННЯ	3 8
<i>Роман ПАЛЬЦАН, Василь ЯРЕМЧУК</i>	
АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРОМИСЛОВОГО КОТЕЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ	13
<i>Олександр СЕНЬКІВ, Андрій ГЕТЬМАН</i>	
КАСКАДНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В СКЛОВАРНІЙ ПЕЧІ	17
<i>Святослав САФРОНОВ, Олександр ДОРОШЕНКО, Ігор ПІТУХ</i>	
МІКРОКОНТРОЛЕРНА СИСТЕМА ЛОКАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ	24
<i>Світозар ВАСЕНКО, Степан ІВАСЬЄВ</i>	
АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВІДСТЕЖЕННЯ ДІЙ КОРИСТУВАЧА НА ОСНОВІ РЕЄСТРУ WINDOWS	30
<i>Євген ПАРУБОК, Оксана СИРОТЮК</i>	
АРХІТЕКТУРА РОЗПОДІЛЕНОЇ ІОТ СИСТЕМИ ВІЯВЛЕННЯ ТА АНАЛІЗУ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ	35
<i>Зеновій БОЙКО, Владислав БОЛЕХІВСЬКИЙ, Олексій ШАПОВАЛ</i>	
СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ РОБОТОЮ ТУРБОАГРЕГАТУ ТЕС	41
<i>Сергій ДРОК, Максим БАГРІЙ</i>	
АРХІТЕКТУРА ТА АЛГОРИТМИ РОБОТИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ РЕЗЕРВУАРНИМ ПАРКОМ НАФТОПРОДУКТІВ	45
<i>Едуард МУРАДЯН, Людмила БАБАЛА</i>	
АДАПТИВНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТНИМИ ПОТОКАМИ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ДАНИХ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ	51
<i>Роман КРІЛЬ</i>	
ОПТИМІЗАЦІЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ УПРАВЛІННЯ ВРАЗЛИВОСТЯМИ ШЛЯХОМ ІНТЕГРАЦІЇ OPENVAS/NESSUS НА ОСНОВІ МОДЕЛІ P-A-R	55

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ**Богдан КОВБАС**КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА СИСТЕМА ОБЛІКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА 201
БАЗІ ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ**Андрій СЕГІН, Юрій ЛЕНЬ, Ірина САВЧЕНКО**СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ ДОСТУПОМ ЖИТЕЛІВ 204
ЖИТЛОВОГО КОМПЛЕКСУ**Ігор БЕТЛЕЙ, Василь ГАЛАСІС, Ольга РОМАНКО, Володимир ПСУЙ**МОНІТОРИНГОВІ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ СЕНСОРІВ ІОТ ДЛЯ 210
АВТОНОМНОГО ЕКОЛОГІЧНОГО ТА ПРОМИСЛОВОГО КОНТРОЛЮ**Людмила ЯЦИНА, Марія РУДА**АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ РІДИН 214
ТА ПОВІТРЯ НА ОСНОВІ СЕНСОРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**Богдана ФРАНАСЮК, Вікторія САВЧЕНКО**ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ 219
ЄДНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ: ТРАДИЦІЙНІ ТА АЛЬТЕРНАТИВНІ
МЕТОДИ ПЕРЕДАЧІ ОДИНИЦЬ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН**Денис ТУЖЕЛЯК, Мар'ян ЧАЙКІВСЬКИЙ**ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ АВТОМАТИЗОВАНИХ ЛІНІЙ 224
ВИРОБНИЦТВА ПРОДУКЦІЇ**Сергій МИРОНЮК, Петро ГУМЕННИЙ**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ВОДОПОСТАЧАННЯ 227
ФЕРМЕРСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА**Марта ФІТКАЙЛО, Тетяна МОРОЗ**АРХІТЕКТУРА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СКЛАДСЬКОЇ СИСТЕМИ НА 233
ОСНОВІ УДОСКОНАЛЕНОГО АЛГОРИТМУ TABU SEARCH**Ігор ХМІЛЬ**СТВОРЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО 237
КЕРУВАННЯ HVAC**Наталія ДМИТРІВ**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТА КЕРУВАННЯ 240
ПАРКУВАЛЬНИМ ПРОСТОРОМ НА ОСНОВІ ІоТ-ТЕХНОЛОГІЙ**Іванна МЕЛЬКО, Христина ПАЛІЙЧУК, Вікторія СОКАЛЬСЬКА,
Олег ЗАСТАВНИЙ**СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМИ 245
ЗАРЯДНИМИ СТАНЦІЯМИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ**Назар КОЗУБАЛЬ, Володимир РУДАВСЬКИЙ, Наталія ВОЗНА**

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕВАТОРОМ 249

					ДП.АКІТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 681.32

*Іванна МЕЛЬКО, Христина ПАЛІЙЧУК, Вікторія СОКАЛЬСЬКА,
Олег ЗАСТАВНИЙ*

Західноукраїнський національний університет

**СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМИ
ЗАРЯДНИМИ СТАНЦІЯМИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ**

Вступ. Сучасний етап розвитку світового та вітчизняного автомобільного ринку характеризується стрімким збільшенням кількості електромобілів. Це зумовлює гостру потребу в розширенні мережі електричних зарядних станцій (ЕЗС). Проте масове підключення потужних споживачів до локальних електричних мереж створює суттєві виклики: виникають пікові навантаження, загрози аварійних вимкнень та дефіцит потужності. Традиційні ЕЗС із фіксованим розподілом енергії не здатні гнучко реагувати на зміну стану мережі. У зв'язку з цим виникає науково-технічна задача розробки інтелектуальних систем автоматизованого керування ЕЗС із функцією динамічного балансування навантаження, що дозволить інтегрувати станції у концепцію Smart Grid без значних витрат на модернізацію силової інфраструктури.

Мета: Розробка архітектури, структурно-функціональних рішень та алгоритмічного забезпечення системи автоматизованого керування багатопортовою електричною зарядною станцією для оптимізації розподілу потужності в реальному часі.

1. Аналіз технологій керування та інтерфейсів ЕЗС

Сучасні ЕЗС класифікуються відповідно до міжнародного стандарту IEC 61851-1[1] за режимами заряджання (Modes 1–4) та типами архітектури інтерфейсів (Type 1/Type 2 для змінного струму, CCS/CHAdeMO/GB/T для постійного струму). Головною особливістю автоматизації ЕЗС є організація безперервного низьковольтного зв'язку між контролером станції (EVSE — Electric Vehicle Supply Equipment) та бортовою системою керування зарядним модулем автомобіля.

У системах змінного струму (Mode 3, роз'єм Type 2) регулювання струму здійснюється аналоговим способом через лінію Control Pilot (CP) за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) із частотою 1 кГц. Зміна шпаруватості сигналу D вказує бортовому чарджеру автомобіля на максимально дозволений струм заряджання:

– при $10\% \leq D \leq 85\%$ максимальний струм визначається як:
 $I = D \cdot 0.6 \text{ (A)}$;

– при $85\% < D \leq 96\%$ струм розраховується за формулою:
 $I = (D - 64) \cdot 2.5 \text{ (A)}$.

У системах швидкого заряджання постійного струму (Mode 4) використовуються складніші цифрові протоколи передачі даних: високочастотний зв'язок по силовій лінії PLC (Power Line Communication за стандартами ISO15118/ DIN70121 в інтерфейсах CCS Combo) або промислова шина CAN-bus (в інтерфейсах CHAdeMO та GB/T). Це вимагає впровадження спеціалізованих

					ДП.АКИТ. 10658671.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

шлюзів, інтелектуальних контролерів та засобів цифрової фільтрації завад у загальну структуру автоматики. Дані системи реалізують алгоритми заряджання батареї за допомогою задавання постійного струму для батареї за допомогою відповідного силового модуля зарядної станції та безпосередньої взаємодії з BMS автомобіля, оминаючи вбудований зарядний пристрій.

2. Структура та апаратні засоби автоматизації

Для забезпечення високої надійності, відмовостійкості та модульності системи було запропоновано структурну схему системи керування зарядкою, яка наведена на рисунку 1.

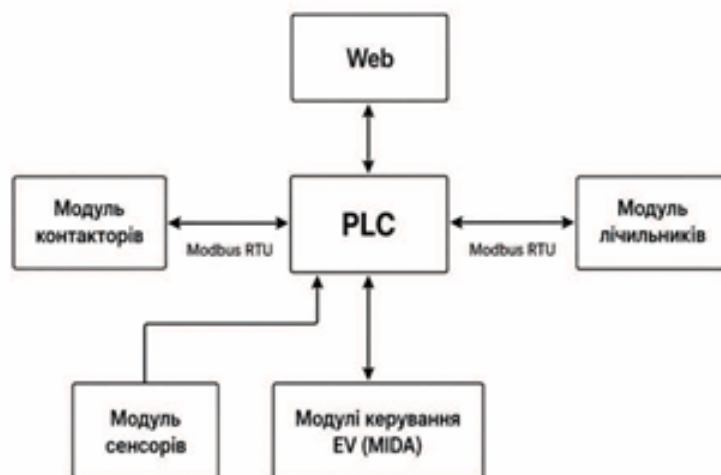


Рисунок 1 - Структурна схема системи керування зарядкою

На даній схемі можна виділити кілька рівнів:

- Нижній рівень (польовий рівень сенсорів та виконавчих механізмів): Складається з первинних вимірювальних перетворювачів струму, напівпровідникових термосенсорів для моніторингу нагріву контактних груп, силових комутаційних контактнів, засобів релейного захисту, а також інтелектуальних трифазних лічильників електроенергії (серії Eastron SDM з інтерфейсом RS-485). Останні забезпечують комерційний та технічний облік енергії за протоколом Modbus RTU.

- Середній рівень (контролерний рівень керування): Реалізований на базі промислового вільно програмованого логічного контролера (ПЛК) серії WAGO Compact Controller 100[2], який працює під управлінням операційної системи Linux реального часу (RT-Linux). У середовищі розробки CODESYS V3.5 мовою ST (Structured Text) реалізовано логіко-обчислювальне ядро системи. ПЛК здійснює циклічне опитування датчиків, обробку аварійних сигналів, перемикання режимів і безпосередній розрахунок керуючих впливів ШІМ. Для розширення каналів збору даних (зокрема, температурних сенсорів Pt1000) використано блоки віддаленого вводу-виводу (модулі серії ME31 та MxxxT) по шині RS-485.

- Верхній рівень (диспетчерське управління та збір даних): Включає людино-машинний інтерфейс (HMI) на базі інтегрованої веб-візуалізації

CODESYS WebVisu для локального контролю оператором стану постів. Також реалізовано комунікаційні модулі для передачі інформації на віддалений сервер керування (нафтобази, хмари оператора мережі) за допомогою протоколів MQTT та спеціалізованого прикладного протоколу OCPP[3] (Open Charge Point Protocol 1.6/2.0.1).

Оскільки дана система призначена для роботи з 4-ма зарядними станціями (модулями) та передбачає їх масштабування. Функціональна схема системи сенсорів та лічильників, які об'єднуються мережею RS485 з протоколом Modbus, наведено на рисунку 2.

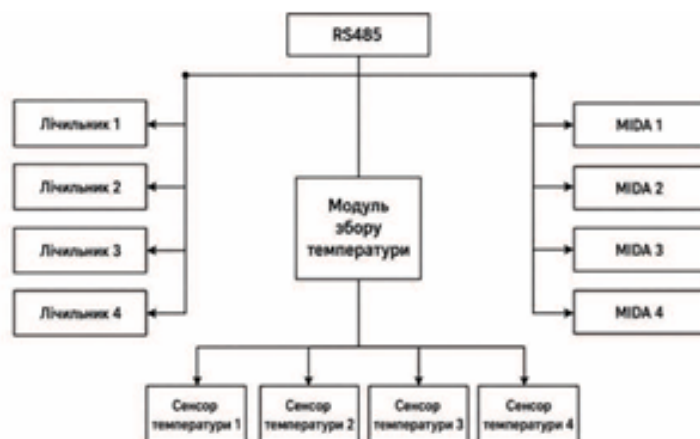


Рисунок 2 - Функціональна схема підключення сенсорів, лічильників та модулів керування

Дана підсистема складається з наступних вузлів:

1.Блок обліку електроенергії: складається з чотирьох інтелектуальних лічильників SDM120M [4] (Лічильник 1–4). Кожен пристрій має унікальну адресу в мережі Modbus, що дозволяє PLC послідовно опитувати їх для отримання даних про напругу, струм та потужність на кожному каналі заряджання.

2.Підсистема термомоніторингу: центральним елементом якої є модуль збору температури. До нього підключено чотири прецизійні сенсори температури, що розміщуються в найбільш критичних зонах (силові роз'єми). Модуль агрегує аналогові сигнали від сенсорів, перетворює їх у цифровий код та передає на основну шину.

3.Блок спеціалізованих контролерів (MIDA 1–4): група контролерів які дозволяють керувати параметрами заряду автомобіля та відображати їх стан.

3. Алгоритм динамічного балансування навантаження

Основою програмного забезпечення ПЛК є розроблений алгоритм динамічного розподілу потужності (Dynamic Load Balancing – DLB) між окремими зарядними постами з урахуванням поточного споживання локального об'єкта. Алгоритм працює в реальному часі (період розрахункового циклу становить 20 мс) за наступним математичним принципом:

$$P_{avail}(t) = \left(P_{max} - \sum P_{home}(t) \right) \cdot K_{saf},$$

де P_{max} – виділена максимальна потужність на весь об'єкт від трансформаторної

підстанції; $\Sigma P_{home}(t)$ – сумарна потужність, що споживається пріоритетними споживачами об'єкта (освітлення, побутові прилади, вентиляція) у поточний момент часу t ; $K_{saf} = 0.9 \dots 0.95$ – коефіцієнт безпеки для запобігання хибному спрацюванню вхідних автоматичних вимикачів захисту при кидках струму.

ПЛК безперервно аналізує значення доступної потужності $P_{avail}(t)$, визначає кількість підключених та активних на цей момент електромобілів (N), після чого пропорційно або з урахуванням виділених пріоритетів (наприклад, за часом підключення або комерційним тарифом) розраховує уставку струму I_{set} для кожного поста:

$$I_{set} = \frac{P_{avail}(t)}{N \cdot U_{nominal} \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi}.$$

У програмному забезпеченні жорстко реалізовано обмеження: якщо розрахований струм на один пост падає нижче 6А (мінімальний технологічний поріг за стандартом IEC61851), ПЛК переводить цей пост у режим очікування (Suspend), відновлюючи процес заряджання лише після звільнення потужності іншими постами або зниження споживання об'єкта.

Для комерційного обліку відпущеної енергії в кВт·год у математичне забезпечення інтегровано функціональний блок чисельного інтегрування миттєвої потужності за методом прямокутників:

$$E = \sum_{k=1}^M P_{post}(k \cdot \Delta t) \cdot \Delta t,$$

де $\Delta t = 2$ с – дискретний крок зрізу даних для зменшення похибки накопичення. Також реалізовано захисну функцію Power Derating (ступінчасте зниження зарядного струму) у разі фіксації температури силового кабелю вище 70°C та повне аварійне відключення контактора при $T \geq 80$ °C

Висновок. У роботі спроектовано багаторівневу структуру системи автоматизованого керування ЕЗС на базі сучасних засобів промислової автоматизації (ПЛК WAGO, середовище CODESYS) та розроблено алгоритм динамічного балансування навантаження. Запропоноване рішення дозволяє оптимізувати використання наявної електричної потужності об'єктів, виключає ризики перевантаження мережі та забезпечує стабільний процес паралельного заряджання кількох транспортних засобів.

Перелік використаних джерел.

1. IEC 61851-1:2017. Electric vehicle conductive charging system - Part 1: General requirements. International Electrotechnical Commission, 2017. 183 p.
2. WAGO Compact Controller 100: Технічна документація та керівництво з експлуатації контролера серії 751-9301. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.wago.com/global/plcs-controllers/compact-controller-100>
3. Open Charge Alliance. Open Charge Point Protocol (OCPP) 1.6 / 2.0.1 Specification. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.openchargealliance.org/protocols/ocpp-201/>
4. Eastron SDM120M Smart Meter: User Manual and Modbus Protocol Specification. Eastron Electronic Instruments Co., Ltd, 2021. 24 p.