

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти – бакалавр
за освітньо-професійною програмою
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

зі спеціальності
151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

тема роботи:

***«Проектування інформаційної підсистеми обміну даними
автоматизованої системи керування енергопостачанням підприємства»***

Виконав студент гр. АКІТ-22	_____ Башта М. П.
Керівник	_____ Тронь В.В.
Нормоконтроль	_____ Маринич І. А.
Завідувач кафедри	_____ Рубан С. А.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Бакалавр

Спеціальність: 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою: к.т.н. Рубан С.А.

« 26 » січня 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

студентові групи АКТ-22 Башиї Марії Павлівні

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Проектування інформаційної підсистеми обміну даними автоматизованої системи керування енергопостачанням підприємства»

затверджено наказом по університету № 171с від 30.03.2026 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 10.06.2026 р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка обсягом 61с., презентація у Microsoft PowerPoint (слайдів) в електронному та друкованому вигляді

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-2

доц. Тронь В. В.

Нормоконтроль

доц. Маринич І. А.

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	<i>08.04.26</i>
2	<i>Розділ 1</i>	<i>15.04.26</i>
3	<i>Розділ 2</i>	<i>25.05.26</i>
4	<i>Висновки</i>	<i>28.05.26</i>
5	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>03.06.26</i>
6	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	<i>04.06.26</i>
7	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	<i>07.06.26</i>

6. Дата видачі завдання: 28.01.2026р.

Керівник _____ / Тронь В. В./

7. **Запевнення:** Я, Башта Марія Павлівна, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомлений.

Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Студент _____ / Башта М. П./

АНОТАЦІЯ

Башта М. П. Проектування інформаційної підсистеми обміну даними автоматизованої системи керування енергопостачанням підприємства: кваліфікаційна робота бакалавра : 151 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології. Кривий Ріг. Криворізький національний університет, 2026. 61 с.

Об'єктом дослідження є інформаційна інфраструктура автоматизованої системи керування енергопостачанням підприємства, а предметом дослідження — методи, мережеві протоколи та топологічні моделі організації надійної підсистеми обміну даними АСКЕ.

Метою роботи є підвищення ефективності управління режимами електроспоживання шляхом розробки та моделювання надійної інформаційної підсистеми АСКЕ на базі Industrial Ethernet.

У першому розділі проаналізовано систему енергопостачання як об'єкт автоматизації та розглянуто ієрархічну структуру АСКЕ. Досліджено сучасні промислові протоколи (Modbus, IEC 61850, OPC UA) та сформульовано технічні вимоги до мережевої інфраструктури обміну даними.

У другому розділі проведено проектування інформаційної підсистеми АСКЕ за концепцією «цифрової підстанції» з комбінованою топологією мережі. Розроблено та досліджено імітаційну модель у середовищі Cisco Packet Tracer. Підтверджено логічну зв'язність вузлів та високу відмовостійкість мережі завдяки протоколу RSTP при імітації обриву магістралі. Надано рекомендації щодо поетапного впровадження системи та забезпечення кібербезпеки.

АСКЕ, ІНФОРМАЦІЙНА ПІДСИСТЕМА, INDUSTRIAL ETHERNET, IEC 61850, ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ВІДМОВОСТІЙКІСТЬ.

					КНУ КРБ.151.26.05.00.ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	АНОТАЦІЯ					
Розроб.		Башта М.П.								
Перевір.		Тронь В.В..								
Н. Контр.		Маринич І.А.								
Затверд.		Маринич І.А.								
					Літ.		Арк.		Аркушів	
							3		1	
					КНУ АКТ-22					

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯМ ПІДПРИЄМСТВ ТА ЗАСОБІВ ОБМІНУ ДАНИМИ	8
1.1 Характеристика системи енергопостачання підприємства як об'єкта автоматизації	8
1.2 Структура автоматизованих систем керування енергопостачанням	13
1.3 Аналіз сучасних технологій та протоколів обміну даними в АСК	15
1.4 Аналіз мережевих рішень для промислових систем керування	23
1.5 Формулювання вимог до інформаційної підсистеми обміну даними	32
Висновки за розділом.....	35
РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ПІДСИСТЕМИ ОБМІНУ ДАНИМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯМ ПІДПРИЄМСТВА	36
2.1 Розробка структури автоматизованої системи керування енергопостачанням	36
2.2 Вибір архітектури інформаційної підсистеми передачі даних	39

					КНУ КРБ.151.26.05.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Баишта М.П.			ЗМІСТ			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Тронь В.В.								4	2
								КНУ АКІТ-22			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

2.3 Вибір мережевих технологій і протоколів обміну даними	41
2.4 Розробка топології комп'ютерної мережі системи керування	43
2.5 Моделювання та оцінювання параметрів обміну даними	48
2.6 Обґрунтування технічних рішень та рекомендації щодо впровадження	51
Висновки до розділу	55
ВИСНОВКИ	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	58

ВСТУП

Сучасний розвиток промисловості України супроводжується активним впровадженням цифрових технологій та засобів автоматизації у виробничі процеси. Особливе значення мають великі підприємства безперервного циклу виробництва, робота яких пов'язана з використанням потужного технологічного обладнання та значних обсягів електроенергії. Надійність функціонування таких об'єктів, їх економічна ефективність і виробнича безпека значною мірою залежать від стабільної роботи системи енергопостачання. Саме тому енергетична інфраструктура сучасного промислового підприємства є складною багаторівневою системою, до складу якої входять підстанції, кабельні мережі, комутаційне обладнання та системи релейного захисту.

Процес енергопостачання промислового підприємства включає приймання, перетворення, розподіл і споживання електричної енергії в умовах постійної зміни режимів навантаження. Навіть короточасні відхилення параметрів мережі або перебої в живленні потужних електроприводів можуть призвести до порушення виробничого процесу, пошкодження обладнання та значних економічних втрат. У зв'язку з цим важливого значення набувають безперервний контроль параметрів електромережі, моніторинг технічного стану обладнання та оперативне диспетчерське управління.

Для реалізації цих функцій на промислових підприємствах використовуються автоматизовані системи керування енергопостачанням, які забезпечують збір телеметричних даних, диспетчерський контроль, технічний і комерційний облік електроенергії, а також роботу систем релейного захисту та автоматики. Проте ефективність таких систем часто обмежується неоднорідністю обладнання та програмних засобів. Унаслідок поетапної модернізації на одному підприємстві одночасно експлуатуються як сучасні цифрові пристрої, так і застаріле обладнання, що використовує різні

					КНУ КРБ.151.26.05.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Баишта М.П.			ВСТУП			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Тронь В.В.								6	2
								КНУ АКІТ-22			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

інтерфейси та протоколи зв'язку.

Наявність різнорідних пристроїв ускладнює створення єдиного інформаційного простору підприємства. На багатьох об'єктах обмін даними здійснюється із застосуванням несумісних або застарілих протоколів, що негативно впливає на швидкодію та надійність передачі інформації. В умовах потужних електромагнітних завад виникають затримки передавання даних, а пропускна здатність існуючих каналів зв'язку не завжди відповідає сучасним вимогам роботи в реальному часі. Тому побудова ефективної системи диспетчерського керування неможлива без створення сучасної інформаційної підсистеми обміну даними.

Актуальність теми дипломної роботи визначається необхідністю підвищення енергоефективності та надійності функціонування промислових енергетичних систем в умовах цифрової трансформації виробництва. Якість роботи диспетчерських служб безпосередньо залежить від швидкості та надійності передачі інформації між польовими пристроями, підстанціями та центральними серверами обробки даних. Використання технологій Industrial Ethernet, волоконно-оптичних ліній зв'язку та сучасних промислових протоколів, зокрема Modbus TCP, OPC UA та IEC 61850, дозволяє підвищити швидкість і стабільність інформаційного обміну, а також забезпечити стійкість мережі до впливу електромагнітних завад.

Проектування сучасної інформаційної підсистеми обміну даними створює основу для подальшого розвитку інтелектуальних систем керування енергетичними ресурсами підприємства. Побудова масштабованої та уніфікованої мережевої інфраструктури дозволяє спростити модернізацію обладнання, підвищити рівень інформаційної безпеки та забезпечити інтеграцію окремих енергетичних об'єктів у єдиний цифровий простір. Таким чином, вибір мережевих технологій, топології зв'язку та протоколів обміну даними є важливим технічним завданням, вирішення якого має практичне значення для підвищення ефективності роботи сучасних промислових підприємств.

					<i>КНУ КРБ.151.26.05.00.ПЗ</i>	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯМ ПІДПРИЄМСТВ ТА ЗАСОБІВ ОБМІНУ ДАНИМИ

1.1 Характеристика системи енергопостачання підприємства як об'єкта автоматизації

Розглянемо що таке системи енергопостачання підприємства, а також розберемо її складові та вимоги.

Система енергопостачання підприємства визначається як сукупність технічних засобів, призначених для забезпечення виробництва електричною енергією, що охоплює процеси її генерації, передачі та розподілу між споживачами. Функціонування такої системи здійснюється в синхронному режимі, за якого процеси виробництва і споживання електроенергії перебувають у постійному балансі, що є необхідною умовою підтримання її стабільної роботи. Система енергопостачання включає сукупність взаємопов'язаних елементів, які забезпечують виробництво, передачу, розподіл і споживання енергії.

Основаними елементами системи є електроустановки, електричні мережі, лінії електропередачі, підстанції, розподільних пристроїв

Електроустановки визначаються як технічні об'єкти, у яких здійснюються процеси генерації, перетворення, передачі, розподілу та використання електричної енергії. Залежно від рівня напруги їх класифікують на установки до 1000 В і понад 1000 В.

Електричні мережі є складовою системи електропостачання,

					КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Баишта М.П.			РОЗДІЛ 1			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Тронь В.В.								8	15
								КНУ АКІТ-22			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

призначеною для транспортування та розподілу електроенергії. Вони охоплюють лінії електропередачі, підстанції, а також розподільні та комутаційні пункти, що функціонують у межах певної території.

Лінії електропередачі являють собою систему провідників, за допомогою яких здійснюється передача електричної енергії від джерел генерації до споживачів, а також її подальший розподіл між окремими електроприймачами.

Підстанція визначається як електроустановка, призначена для перетворення та розподілу електричної енергії, яка включає трансформатори, інші перетворювальні пристрої, розподільні системи та засоби керування.

Розподільний пристрій — це електроустановка, що забезпечує прийом і розподіл електроенергії та складається з комутаційної апаратури, систем захисту й автоматики, струмопровідних шин і допоміжних елементів.

1.1.2 Вимоги до побудови схем електропостачання.

Вимоги до побудови схем електропостачання визначаються низкою факторів, серед яких основні можна узагальнити таким чином.

По-перше, джерела живлення доцільно розміщувати якомога ближче до електроустановок споживачів з метою зменшення втрат енергії та підвищення ефективності системи.

По-друге, система електропостачання має забезпечувати необхідний рівень надійності електроживлення як для підприємства в цілому, так і для окремих споживачів відповідно до їх категорії відповідальності.

По-третє, схеми електропостачання зазвичай проектується таким чином, щоб усі їх елементи перебували під напругою, що сприяє безперервності енергопостачання.

По-четверте, робота основних елементів системи (зокрема ліній і трансформаторів) переважно передбачається роздільною, оскільки паралельний режим може призводити до збільшення струмів короткого замикання та ускладнення роботи релейного захисту.

					<i>КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ</i>	Арк.
						9
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

По-п'яте, при проектуванні необхідно передбачати глибоке секціонування шин на всіх рівнях розподілу електроенергії — від вузлових підстанцій до підстанцій нижчої напруги.

По-шосте, система повинна забезпечувати належну якість електричної енергії, включаючи стабільність параметрів, мінімізацію коливань і допустимі відхилення напруги в різних режимах роботи (нормальному, аварійному та післяаварійному).

По-сьоме, як схема, так і конструктивне виконання системи мають враховувати перспективу зростання електричних навантажень протягом найближчих 10 років.

По-восьме, система електропостачання повинна відповідати вимогам економічності, тобто забезпечувати мінімальні розрахункові витрати, а також відзначатися простотою, зручністю та безпекою в експлуатації.

Наведені положення відображають ключові принципи, яких слід дотримуватися при проектуванні та функціонуванні систем електропостачання на всіх рівнях.

1.1.3 Автоматизація систем енергопостачання.

Тепер давайте розберем аспекти що до автоматизації системи енергопостачання.

Система електропостачання характеризується великою кількістю взаємопов'язаних елементів (ліній електропередачі, трансформаторів, підстанцій, електроприймачів), які функціонують у різних режимах роботи. Це зумовлює необхідність застосування засобів автоматичного контролю параметрів електричної мережі, зокрема напруги, струму та частоти, а також систем диспетчеризації, що забезпечують централізоване керування та моніторинг режимів роботи системи.

Паралельно з силовою частиною функціонує підсистема автоматизації, яка охоплює засоби вимірювання, контролю та керування. До її складу входять датчики, програмовані логічні контролери, релейний захист, системи

					КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

сигналізації та диспетчерського керування SCADA. Структурну взаємодію основних елементів системи наведено на рисунку 1.1.

Підтримання оптимальних режимів роботи забезпечується за допомогою автоматичного регулювання навантаження, напруги та потоків електроенергії. Це дозволяє не лише підвищити надійність функціонування системи, а й забезпечити економічну ефективність за рахунок зменшення втрат електроенергії та раціонального використання обладнання. Для стабілізації параметрів мережі застосовуються системи автоматичного регулювання напруги, функціональна схема яких наведена на рисунку 1.2.

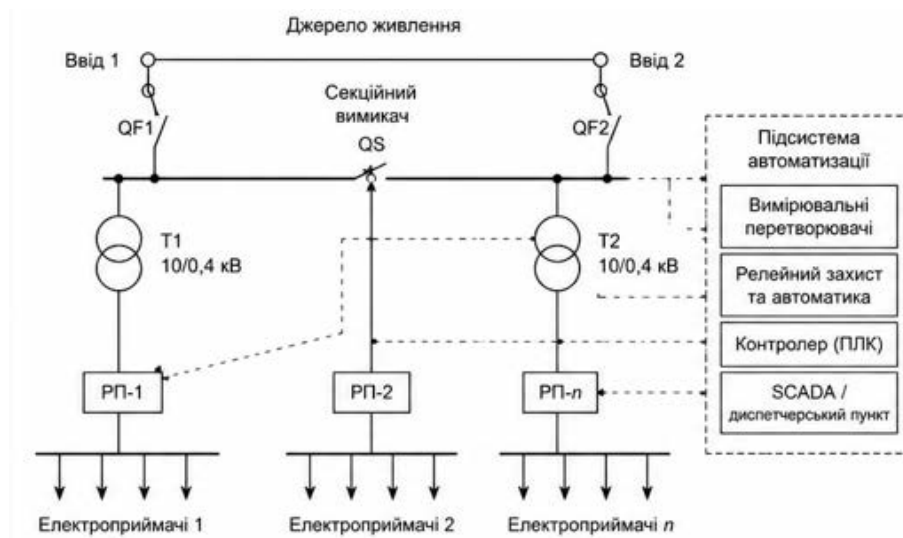


Рисунок 1.1 Структурна схема системи енергопостачання підприємства як об'єкта автоматизації

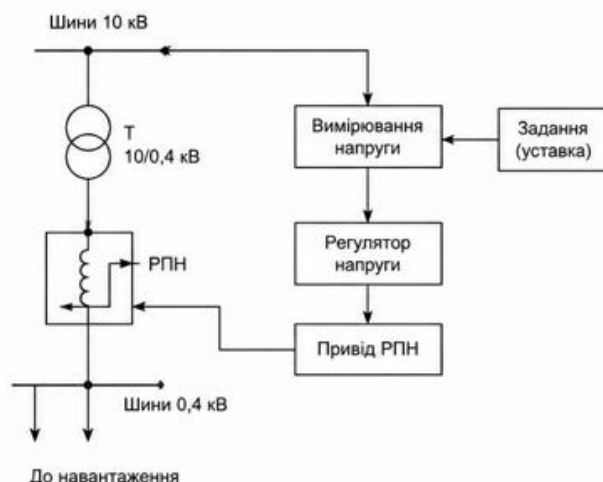


Рисунок 1.2 Функціональна схема автоматичного регулювання напруги (АРН)

Одним із найважливіших завдань автоматизації є забезпечення безперервності електропостачання споживачів. З цією метою використовуються системи автоматичного включення резерву (АВР), які забезпечують автоматичне переключення живлення на резервне джерело у випадку аварійного відключення основної лінії. Застосування АВР дозволяє мінімізувати перерви в електропостачанні та підвищити надійність роботи підприємства. Принцип роботи системи АВР наведено на рисунку 1.3.

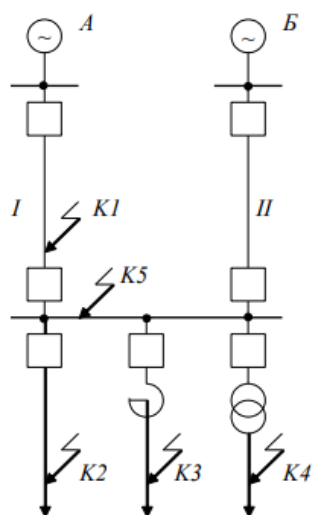


Рисунок 1.3 Схема автоматичного включення резерву (АВР)

Окрему роль у системі автоматизації відіграє забезпечення електробезпеки, що реалізується через використання релейного захисту, автоматики відключення аварійних ділянок та систем сигналізації. Для запобігання порушенню стійкості енергосистеми при зміні частоти застосовується автоматичне частотне розвантаження (АЧР), яке забезпечує автоматичне відключення частини навантаження в аварійних режимах. Функціональна схема АЧР наведена на рисунку 1.4.



Рисунок 1.4 Схема автоматичного частотного розвантаження (АЧР)

Крім того, система енергопостачання як об'єкт автоматизації передбачає ведення та аналіз технічних даних, що дає можливість прогнозувати розвиток навантажень, планувати модернізацію обладнання та підвищувати ефективність експлуатації в довгостроковій перспективі.

Отже, система енергопостачання підприємства є складним динамічним об'єктом автоматизації, для якого характерні багатопараметричність, необхідність високої надійності, оперативності керування та забезпечення економічно оптимальних режимів роботи.

1.2 Структура автоматизованих систем керування енергопостачанням

1.2.1 Структура автоматизованих систем керування.

Структура автоматизованих систем керування енергопостачанням являє собою територіально розподілену інформаційно-вимірювальну систему з багаторівневою організацією та ієрархічним принципом обробки даних. Кількість рівнів і загальна архітектура побудови такої системи визначаються на етапі розробки технічного завдання та залежать від складності енергетичних об'єктів і їх кількості. Узагальнена схема багаторівневих автоматизованих систем керування наведена на рисунку .



Рисунок 1.5 Стандартна схема багаторівневих автоматизованих систем.

1.2.2 Опис нижнього рівня

Нижній рівень АСКЕ є базовим елементом системи, оскільки саме тут здійснюється безпосередній контакт із фізичними процесами в електричній мережі. Його основне призначення полягає у вимірюванні електричних параметрів та забезпеченні швидкого реагування на аварійні режими.

					КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

До основних компонентів цього рівня належать:

Датчики струму та напруги забезпечують вимірювання основних електричних величин у мережі. Вони можуть бути реалізовані у вигляді трансформаторів струму та напруги або сучасних електронних сенсорів. Отримані дані використовуються для контролю режимів роботи обладнання.

Інтелектуальні електролічильники виконують функцію комерційного та технічного обліку електроенергії. Вони здатні фіксувати активну та реактивну енергію, підтримують багато тарифні режими та передають дані до вищих рівнів системи у цифровому вигляді.

Пристрої релейного захисту та автоматики призначені для виявлення аварійних режимів, таких як короткі замикання або перевантаження. У разі виникнення таких ситуацій вони автоматично відключають пошкоджену ділянку мережі, забезпечуючи її захист. Сучасні реалізації таких пристроїв базуються на мікропроцесорних технологіях.

Загалом, даний рівень характеризується роботою в режимі реального часу та високими вимогами до надійності, оскільки саме тут приймаються критично важливі захисні рішення.

1.2.3 Опис середнього рівня.

Середній рівень АСКЕ виконує функції проміжної ланки між польовими пристроями та диспетчерським центром. Його основне завдання полягає в локальній автоматизації технологічних процесів, а також у зборі та передачі інформації.

Ключовими елементами цього рівня є:

Програмовані логічні контролери (ПЛК), які реалізують алгоритми автоматичного керування електрообладнанням. Вони обробляють сигнали з датчиків, виконують логічні операції та керують комутаційними апаратами відповідно до заданих програм.

Пристрої збору та передачі даних (УСПД), які забезпечують агрегацію інформації з лічильників та інших вимірювальних пристроїв. Вони виконують

					КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

попередню обробку даних, їх структурування та передачу на верхній рівень із використанням стандартних промислових протоколів зв'язку.

Функціонально цей рівень забезпечує як локальне керування об'єктами енергосистеми, так і безперервний обмін інформацією між нижнім та верхнім рівнями, що є критично важливим для стабільної роботи всієї системи.

1.2.4 Опис верхнього рівня.

Верхній рівень є центральною частиною АСКЕ, оскільки саме тут здійснюється комплексний моніторинг, аналіз та оперативне управління енергетичною системою підприємства.

Основними складовими цього рівня є:

SCADA-системи, які забезпечують збір даних у режимі реального часу, їх візуалізацію та керування технологічними процесами. Через інтерфейси оператора відображаються стан мережі, аварійні повідомлення та параметри обладнання.

Сервери баз даних, що використовуються для зберігання історичної інформації про роботу енергосистеми. На їх основі здійснюється аналіз режимів роботи, формування звітності та прогнозування навантажень.

Автоматизовані робочі місця диспетчерів (АРМ), які забезпечують взаємодію оператора з системою. Через них здійснюється контроль обладнання, перегляд однолінійних схем та прийняття оперативних рішень.

Даний рівень характеризується високим ступенем централізації управління та значними аналітичними можливостями, що дозволяє оптимізувати роботу всієї енергетичної системи.

1.3 Аналіз сучасних технологій та протоколів обміну даними в АСК

1.3.1 Визначення автоматичних систем керування.

Автоматичні системи керування (АСК) являють собою складні людино-машинні комплекси, що об'єднують технічні засоби, програмне забезпечення та організаційно-методичні підходи для автоматизованого збору, обробки

					КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

інформації, моніторингу та підтримки прийняття управлінських рішень щодо складних об'єктів. На відміну від повністю автоматичних систем, вони передбачають участь людини на етапах аналізу даних і стратегічного планування.

Для аналізу візьмемо найпоширеніші протоколи для енергопостачання — Modbus, IEC 61850 та OPC UA.

1.3.2 Протокол Modbus RTU.

Modbus RTU — це послідовна реалізація протоколу Modbus, яка використовується для обміну даними через інтерфейси RS-485 або RS-232. Він широко застосовується на польовому рівні автоматизованих систем енергопостачання завдяки своїй простоті та надійності.

Передача даних у Modbus RTU здійснюється у вигляді компактного бінарного фрейму, що включає адресу пристрою, код функції, поле даних і контрольну суму CRC-16. Між кадрами передбачена пауза для синхронізації, що підвищує стійкість обміну в умовах промислових перешкод.

| Адреса slave (1 байт) | Код функції (1 байт) | Дані (N байт, max 252) | CRC-16 (2 байти) |

Протокол підтримує роботу в режимі «один master — багато slave», де головний пристрій (наприклад, ПЛК) опитує підключені датчики, лічильники та релейні пристрої.

Основні характеристики:

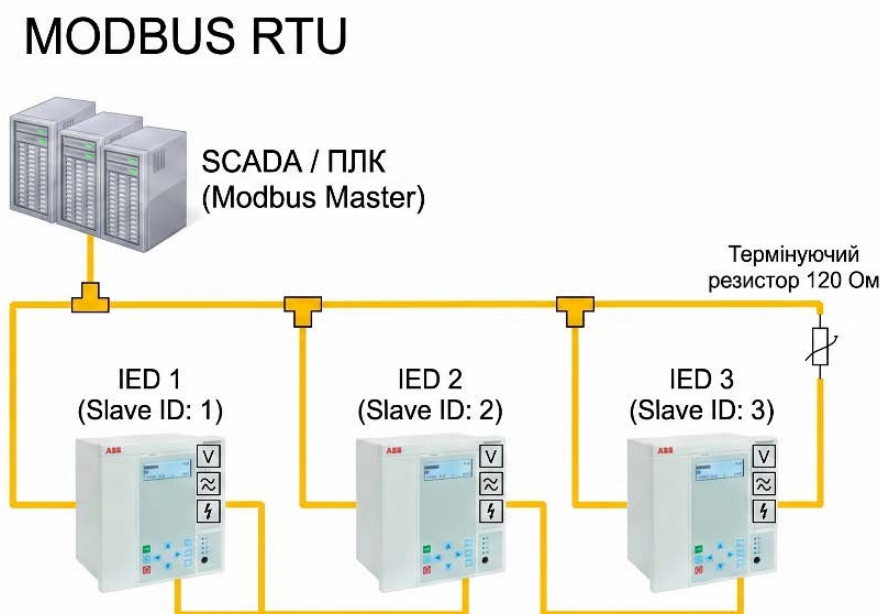
- швидкість передачі: 1200–115200 біт/с (найчастіше 9600–19200 біт/с);
- кількість пристроїв на шині: до 247;
- максимальна дистанція: до 1200 м (RS-485);
- архітектура: один master і багато slave;
- топологія: лінійна шина.

Modbus RTU використовується для збору даних про енергоспоживання, стан обладнання та параметри електрооб'єктів. Його перевагами є простота впровадження, низька вартість і висока поширеність, тоді як основними

					КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

обмеженнями є невисока швидкість та відсутність вбудованих механізмів захисту даних. Типова шина для цього протоколу:

ПЛК (master) ↔ Лічильник1 (адр.01) + Реле захисту2 (адр.05) + Датчик3 (адр.10)



Рисуюнок 1.6 Схема роботи протоколу Modbus RTU.

1.3.3 Протокол Modbus TCP

Modbus TCP — це мережева версія протоколу Modbus, адаптована для роботи в Ethernet-мережах, яка застосовується переважно на середньому та верхньому рівнях автоматизованих систем керування енергопостачанням. Вона забезпечує обмін даними між SCADA-системами, контролерами та іншими мережевими пристроями в межах IP-інфраструктури підприємства.

Передавання даних у Modbus TCP здійснюється шляхом інкапсуляції стандартного Modbus PDU в TCP/IP-пакет із додаванням МВАР-заголовка, який містить службову інформацію для коректної маршрутизації та обробки запитів. Обмін даними реалізується через стандартний TCP-порт 502, що забезпечує сумісність між різними виробниками обладнання.

Основні характеристики:

- швидкість передачі: 10/100/1000 Мбіт/с (залежно від Ethernet-мережі);
- архітектура: client-server;

- кількість пристроїв: практично необмежена в межах IP-мережі;
- середовище роботи: локальні та розподілені мережі (LAN/WAN);
- тип обміну: запит-відповідь через TCP-з'єднання.

У системах енергопостачання Modbus TCP використовується для збору телеметричних даних із підстанцій, контролю параметрів електрообладнання, а також для дистанційного керування комутаційними апаратами. Окремо слід відзначити його роль в інтеграції з корпоративними інформаційними системами (ERP, MES), що дозволяє об'єднати виробничі та диспетчерські рівні керування.

Перевагами протоколу є висока швидкість обміну даними, масштабованість, а також можливість одночасної роботи кількох клієнтів із серверними пристроями. Водночас до недоліків належать відсутність вбудованих механізмів шифрування та захисту, а також затримки, характерні для TCP/IP-протоколу, що обмежує його використання в задачах жорсткого реального часу.

Типова мережа на підприємстві:

SCADA (client) ↔ Switch ↔ ПЛК1 (server, IP:192.168.1.10) + ПЛК2 (IP:192.168.1.11) + Лічильник (IP:192.168.1.50).

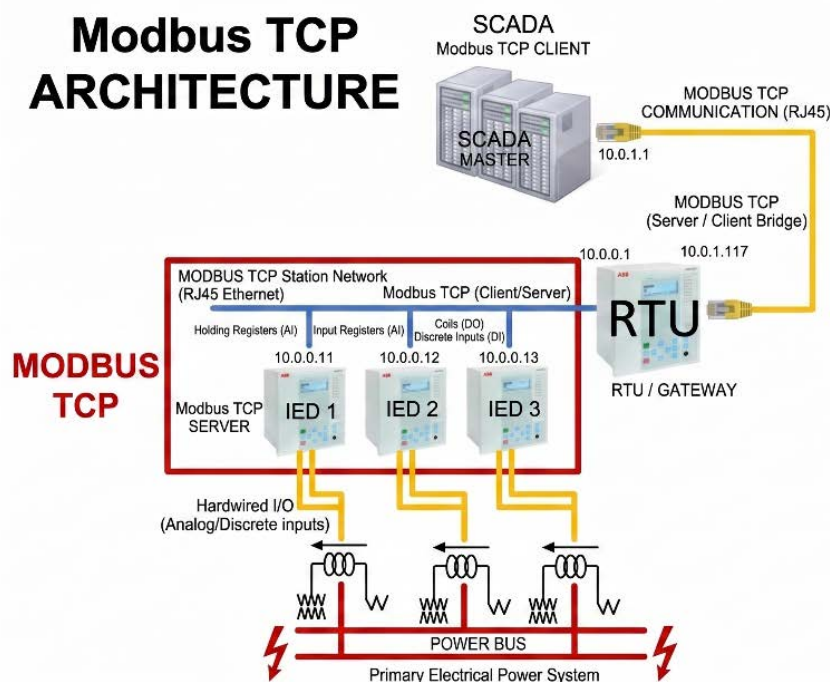


Рисунок 1.7 Схема роботи протокола Modbus TCP.

					КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

1.3.4 Протокол IEC 61850

IEC 61850 — це міжнародний стандарт комунікаційних мереж і систем автоматизації підстанцій, розроблений Міжнародною електротехнічною комісією (IEC) для концепції «розумних мереж» (Smart Grid). На відміну від традиційних протоколів, він має об'єктно-орієнтовану архітектуру та підтримує кілька типів обміну даними, що забезпечує високу гнучкість і швидкодію в енергетичних системах.

Передавання інформації в IEC 61850 реалізується через три основні класи повідомлень: MMS, що використовується за принципом клієнт-сервер для взаємодії зі SCADA; GOOSE, який забезпечує подієво-орієнтований обмін критичними сигналами з мінімальною затримкою; а також Sampled Values, які передають потокові аналогові вимірювання в режимі реального часу.

Архітектура:

Process Level (датчики → Merging Units, SV)

↓ GOOSE/SV (Ethernet)

Bay Level (IED: реле Siemens SIPROTEC, ABB REF)

↓ MMS/GOOSE

Station Level (SCADA, RTU)

Основні характеристики:

- тип моделі даних: об'єктно-орієнтована (Logical Nodes);
- основні повідомлення: MMS, GOOSE, Sampled Values;
- середовище передавання: Ethernet-мережі;
- час реакції GOOSE: менше 4 мс;
- підтримка промислових стандартів резервування (PRP/HSR);
- конфігурація системи: XML-файли (SCL).

Архітектурно стандарт поділяє систему на рівні процесів, комірок (bay level) та підстанції. На процесному рівні розташовані датчики та вимірювальні блоки, на рівні комірок — інтелектуальні пристрої захисту та керування (IED), а на рівні підстанції — SCADA-системи та диспетчерські комплекси. Обмін

даними між рівнями здійснюється через Ethernet із використанням GOOSE та Sampled Values для критичних сигналів і MMS для конфігурації та моніторингу.

У системах автоматизації енергопостачання IEC 61850 застосовується для реалізації цифрових підстанцій, інтеграції пристроїв різних виробників і забезпечення швидкодіючого релейного захисту. Його перевагами є висока швидкість обміну даними, зменшення обсягу кабельних з'єднань та підтримка концепції Smart Grid. Водночас стандарт є складним у впровадженні, потребує спеціалізованої конфігурації (SCL) та має вищі вимоги до кваліфікації персоналу і вартості обладнання.

Його застосування в Україні є обов'язковим для нових підстанцій 35-750 кВ (ПСЄП). Типові IED: Siemens 7SJ8x, ABB REL670. Перехід з Modbus/DNP3 через шлюзи.

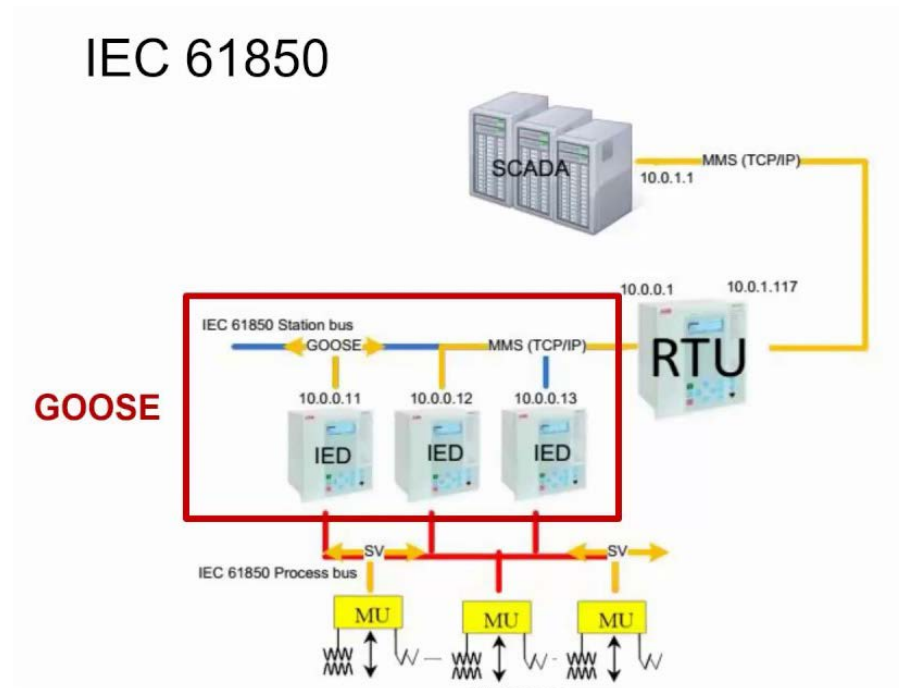


Рисунок 1.8 Схема роботи протоколу IEC 61850

1.3.5 Протокол OPC UA

OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) — це платформи-незалежний промисловий протокол обміну даними між пристроями, розроблений OPC Foundation у 2008 році як наступник OPC Classic. Він орієнтований на безпечну передачу структурованої інформації в

промислових системах і широко використовується в концепціях ІоТ та інтегрованих автоматизованих системах керування.

Архітектура:

Протокол має шарувату структуру з 5 рівнями:

Application Layer (безпека, сесії)



Service Layer (сервіси: Read/Write/Subscribe)



Information Model (Nodes: Variables, Objects, Methods)



Mapping Layer (протоколи: UA TCP, HTTPS, MQTT)



Transport Layer (UA Binary, SOAP)

На відміну від традиційних протоколів, OPC UA базується на багаторівневій інформаційній моделі, яка описує дані у вигляді об'єктів, змінних і методів, а не у вигляді простих реєстрів. Це забезпечує семантичну зрозумілість даних і спрощує інтеграцію різноманітного обладнання.

Основні характеристики:

- інформаційна модель: об'єктно-орієнтована (Nodes: Objects, Variables, Methods);
- моделі обміну: Client-Server та PubSub;
- протоколи транспорту: UA TCP, HTTPS, MQTT;
- порт за замовчуванням: 4840;
- рівень безпеки: шифрування AES128/AES256, цифрові підписи та сертифікати X.509;
- підтримка підписки на дані: від 10 мс до годинного інтервалу;
- масштабованість: від польових пристроїв до хмарних систем.

Архітектурно OPC UA має багатоварову структуру, що включає інформаційний рівень (модель даних), сервісний рівень (читання, запис, підписка на дані), рівень відображення протоколів та транспортний рівень. Це

					КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

дозволяє реалізувати гнучку інтеграцію між ПЛК, SCADA-системами та корпоративними платформами.

У системах автоматизації енергопостачання OPC UA застосовується на верхньому рівні для інтеграції SCADA з ERP/MES системами, а також для уніфікованого доступу до даних різних пристроїв. Його ключовими перевагами є висока безпека, кросплатформність і семантична модель даних, що значно полегшує інтеграцію складних систем. Водночас до недоліків належать підвищена складність впровадження та більші вимоги до обчислювальних ресурсів порівняно з простішими протоколами, такими як Modbus.

Типова інтеграція в АСКЕ

ІЕС 61850 (підстанція) → OPC UA Gateway → SCADA → OPC UA → ERP/MES

Приклад: Siemens SIMATIC S7-1500 з вбудованим OPC UA Server передає змінні "Power_kW", "Status" до Wonderware SCADA з моніторингом змін кожні 500мс.

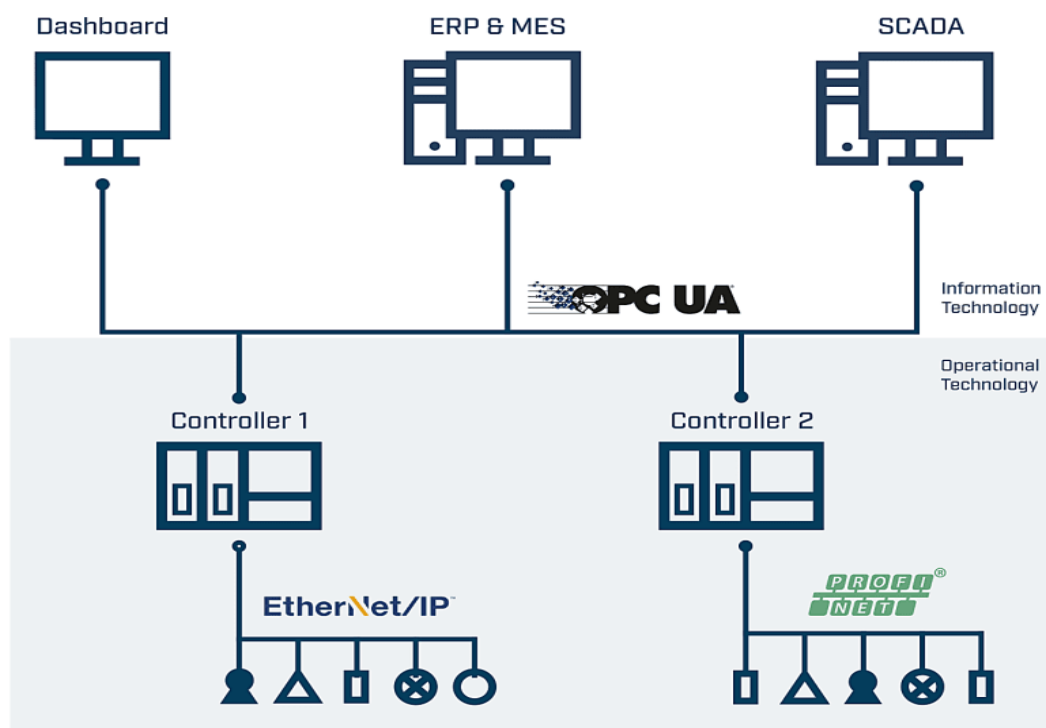


Рисунок 1.9 Схема роботи протоколу OPC UA

1.3.6 Порівняльний аналіз протоколів

Розглянувши кожен протокол ми тепер можемо порівняти їх.(табл.1)

Таблиця 1.1 Порівняння протоколів

Протокол	Швидкість	Надійність	Простота	Застосування
Modbus RTU	Низька (115 кбіт/с)	Середня (без CRC — помилки)	Висока	Полевий рівень
Modbus TCP	Висока (100 Мбіт/с)	Середня (TCP retry)	Висока	ПЛК → SCADA
IEC 61850	Критична (<4 мс GOOSE)	Висока (redundancy)	Низька	Підстанції
OPC UA	Середня (10-100 мс)	Висока (TLS)	Середня	Корпоративний oblik+1

1.4 Аналіз мережевих рішень для промислових систем керування

1.4.1 Поняття Ethernet

На сьогоднішній день Ethernet є найпоширенішою технологією мережевої комунікації у світі, що забезпечує обмін даними між великою кількістю підключених пристроїв у єдиному інформаційному середовищі. Передавання даних у межах Ethernet-мереж може здійснюватися з використанням різних фізичних середовищ, зокрема мідних кабелів, оптоволокна, полімерних волокон, а також бездротових каналів зв'язку, що забезпечує його універсальність у різних умовах експлуатації.

Завдяки своїй простоті та стандартизації Ethernet став базовою технологією сучасних комп'ютерних мереж і фактично становить основу глобальної мережі Інтернет. Його широке впровадження пояснюється

універсальністю, сумісністю та відносною простотою інтеграції в різні інформаційні системи.

До основних переваг Ethernet та пов'язаних із ним мережевих технологій належать:

- простота впровадження та легкість масштабування мережі;
- швидке введення в експлуатацію завдяки стандартизованим принципам побудови;
- висока пропускна здатність (до 10 Гбіт/с і більше в сучасних реалізаціях);
- можливість застосування як в офісних, так і в промислових інформаційних системах.

Таким чином, Ethernet є універсальною технологією, що ефективно використовується як у корпоративних мережах, так і в промислових системах автоматизації.

Поняття Ethernet може розглядатися у двох взаємопов'язаних значеннях. З одного боку, це мережева технологія, спочатку розроблена для організації локальних обчислювальних мереж (LAN). З іншого боку, у сучасних умовах вона набула значного поширення в промислових системах керування.

Промисловий Ethernet використовується для інтеграції інформаційної інфраструктури офісного рівня з виробничими та технологічними системами, забезпечуючи єдиний мережевий простір для обміну даними між різними рівнями автоматизації.

Для початку давайте розглянемо як з'єднуються пристрої. В нас є два види з'єднання: дротовий і бездротовий.

1.4.2 Дротові технології

Почнемо з дротових технологій. До них можна віднести промисловий Ethernet (Мідні кабелі) та оптоволоконний зв'язок.

Промисловий Ethernet.

Промисловий Ethernet (Industrial Ethernet) являє собою стандартизовану адаптацію класичної технології Ethernet, спеціально модифіковану для використання в умовах промислового середовища з метою автоматизації та

					КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

керування технологічними процесами. Він забезпечує передавання даних між елементами виробничих систем із урахуванням підвищених вимог до надійності, завадостійкості та стабільності роботи в складних експлуатаційних умовах. Промисловий Ethernet призначений для забезпечення надійного та детермінованого обміну даними в системах автоматизації виробничих процесів, з урахуванням вимог роботи в режимі реального часу. Він є одним із найбільш поширених протоколів, на основі якого будуються сучасні промислові мережі керування.

Для адаптації стандартного Ethernet до промислових умов використовується низка розширень і модифікацій протоколу TCP/IP, які доповнюють його додатковими функціональними можливостями, зокрема:

- механізмами синхронізації процесів;
- спеціалізованими алгоритмами обміну даними;
- засобами діагностики мережі;
- функціями самовідновлення та корекції помилок.

При цьому фізичний та канальний рівні моделі OSI залишаються без змін, що забезпечує сумісність із стандартним мережевим обладнанням і дозволяє інтегрувати промислові рішення в існуючу Ethernet-інфраструктуру.

Промисловий Ethernet забезпечує взаємодію обладнання різних виробників на різних етапах технологічного процесу, що є важливим для побудови комплексних систем автоматизації. Найчастіше він застосовується для обміну даними між програмованими логічними контролерами (ПЛК) та системами людино-машинного інтерфейсу (НМІ), рідше — для міжконтролерної взаємодії, і ще рідше — для безпосереднього підключення польових пристроїв, таких як датчики та виконавчі механізми. Обладнання Industrial Ethernet повинно бути адаптоване до роботи в складних промислових умовах, зокрема при впливі високих і низьких температур, вібрацій, вологості та електромагнітних завад. На відміну від офісного мережевого обладнання, промислові пристрої забезпечують стабільну роботу в розширеному температурному діапазоні від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$, що дозволяє використовувати

					КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

їх у неопалюваних приміщеннях і на відкритих об'єктах. Промислове Ethernet-обладнання повинно відповідати міжнародним стандартам електромагнітної сумісності, вібростійкості та захисту корпусу від пилу й вологи, зокрема IEC 61000-4, IEC 60255-21 та IEC 60529 (IP67).

Для окремих галузей також застосовуються спеціалізовані стандарти сертифікації, серед яких IEC 61850-3 для енергетичних підстанцій, DNV і Germanischer Lloyd для промислових об'єктів, а також стандарти вибухозахищеності АТЕХ.

Промислові Ethernet-комутатори є важливими елементами сучасних промислових мереж, оскільки забезпечують стабільну та безперервну роботу систем обміну даними. Вони спеціально розроблені для експлуатації в складних умовах виробничого середовища, тому мають підвищену надійність і довговічність порівняно зі звичайними мережевими комутаторами. Промисловий комутатор Ethernet являє собою мережевий пристрій, призначений для об'єднання великої кількості промислового обладнання в єдину інформаційну мережу. Він забезпечує високошвидкісну передачу даних і надійний зв'язок між пристроями автоматизації, технологічним обладнанням та системами керування.

На відміну від офісних рішень, такі комутатори мають спеціальний рівень захисту, що дозволяє їм стабільно працювати в умовах екстремальних температур, підвищеної вологості, вібрацій та значних електромагнітних завад. Завдяки цим характеристикам вони широко застосовуються на промислових підприємствах, електростанціях, транспортних об'єктах і в інших складних виробничих середовищах.

Оптоволоконний зв'язок.

Оптоволоконна технологія є одним із ключових досягнень сучасної інженерії, яке суттєво змінило підходи до передавання даних, організації комунікаційних мереж та функціонування промислової інфраструктури. Незважаючи на просту зовнішню будову у вигляді тонкого скловолокна, її значення для розвитку інформаційних технологій є надзвичайно великим.

					КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Використання оптоволоконного зв'язку забезпечило якісний прорив у таких сферах, як телекомунікації, промислова автоматизація, наукові дослідження та медицина, завдяки високій швидкості передачі інформації, стійкості до завад і можливості роботи на великих відстанях.

Роль оптоволоконних кабелів у сучасних мережах передавання даних є визначальною, особливо у сфері Інтернету. Вони забезпечують основу високошвидкісної та надійної передачі інформації як для кінцевих користувачів, так і для великих інфраструктурних об'єктів, таких як інтернет-провайдери та центри обробки даних.

Оптоволоконні лінії характеризуються високою швидкістю передавання даних, що дозволяє забезпечувати швидкий доступ до мережевих ресурсів і мінімальні затримки під час обміну інформацією. Крім того, вони мають високу надійність і стабільність роботи, оскільки практично не піддаються впливу електромагнітних завад і характеризуються низьким рівнем втрат сигналу навіть за значних навантажень мережі.

Ще однією важливою перевагою є масштабованість оптоволоконної інфраструктури. Такі кабельні системи можуть ефективно обслуговувати велику кількість користувачів і пристроїв, що робить їх оптимальним рішенням для побудови сучасних телекомунікаційних мереж великого масштабу.

У волоконно-оптичних мережах важливим є правильний вибір типу волокна та з'єднувачів, оскільки це безпосередньо впливає на якість і надійність передачі даних. Основними типами є одномодові та багатомодові оптичні волокна, які відрізняються будовою та сферою застосування.

Багатомодові волокна (MM) мають більший діаметр серцевини (50/125 або 62,5/125 мкм) і використовуються для передачі даних на короткі відстані. Вони працюють переважно зі світлодіодними джерелами та забезпечують швидкість до 10 Гбіт/с на відстанях до приблизно 550 м, що робить їх типовими для локальних мереж.

Одномодові волокна (SM) мають меншу серцевину (приблизно 9/125 мкм) і використовують лазерне випромінювання. Вони призначені для

					КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

передавання даних на великі відстані — до 100–120 км — і застосовуються в магістральних та промислових мережах.

Оптоволоконний кабель Elpio(рис 1.4.2) tc'GYFX-12J SM 9/125 (G652D) використовується в телекомунікаційних мережах і системах передачі даних. Завдяки 12 оптичним волокнам у однотрубній конструкції він забезпечує стабільну високошвидкісну передачу інформації з мінімальними втратами та зручний у монтажі.

Плоский кабель FTTH SM 2J 9/125 LSON від ALANTEC призначений для внутрішнього та зовнішнього використання в мережах доступу FTTH. Він має посилену гнучку конструкцію, є діелектричним, стійким до УФ-випромінювання та працює в температурному діапазоні від –20 до +60 °C.

Мультимедійний кабель tc multikabel/350 є комбінованим рішенням, що об'єднує коаксіальні кабелі, виту пару та оптичне волокно в одній оболонці, що дозволяє передавати різні типи сигналів і спрощує побудову мережевої інфраструктури.

1.4.3 Бездротові технології.

Трохи розглянувши дротові технології, давайте перейдемо до бездротових. Їх доволі багато на перший погляд, але розглянемо ті які підходять для роботи на підприємстві. Здебільшого бездротові технології використовують як доповнення до дротових мереж для некритичних завдань: мобільний персонал, периферійні датчики, тимчасові з'єднання. Але ми всього розглянемо декілька технологій.

IWLAN (Industrial Wi-Fi 802.11n/ac/ax)

IWLAN використовується для бездротового підключення мобільних клієнтів, зокрема SCADA-планшетів та НМІ-пристроїв. У промислових умовах застосовуються спеціалізовані точки доступу, наприклад Муха AWK-4131A або Hirschmann BAT-WiFi, розраховані на монтаж у DIN-рейку та роботу в температурному діапазоні приблизно від –40 до +75 °C. Технологія Wi-Fi 6 дозволяє досягати швидкості до 2400 Мбіт/с у діапазоні 5 ГГц, при цьому стабільний радіус дії зазвичай становить 100–300 м із використанням зовнішніх

					КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

антен. У промисловості IWLAN застосовується для мобільного доступу персоналу до систем моніторингу, перегляду трендів і звітності. Для підвищення надійності використовується резервування через dual-band режими (2.4/5 ГГц) та швидкий роумінг клієнтів.

Bluetooth LE Industrial (5.0+)

Промисловий Bluetooth Low Energy використовується для локальних мереж малої кількості пристроїв, зазвичай до восьми вузлів. Сучасні реалізації забезпечують дальність до 50–240 м у режимі Long Range та пропускну здатність до 2 Мбіт/с із дуже низькою затримкою близько 1,6 мс. Основне застосування цієї технології полягає у підключенні бездротових кнопочних панелей керування, налаштуванні реле та зборі даних із датчиків вібрації. У промислових рішеннях використовуються сертифіковані модулі, наприклад Phoenix Contact, із підтримкою безпечних профілів передачі даних.

LoRaWAN (868 МГц)

LoRaWAN застосовується для телеметрії віддалених або малопотужних датчиків. Основною перевагою є велика дальність зв'язку — від 5 до 15 км у відкритій місцевості та близько 1–2 км у промисловій забудові. Передача даних має низьку швидкість (приблизно 0,3–50 кбіт/с), що компенсується наднизьким енергоспоживанням і можливістю роботи пристроїв до 10 років від батареї. Типові застосування включають контроль температури, рівня масла в трансформаторах, а також моніторинг газу чи диму на складах. Для інтеграції використовуються LoRaWAN-шлюзи, такі як Kerlink iStation або Milesight UG65.

Промисловий 5G (Private Networks)

Приватні 5G-мережі орієнтовані на великі промислові підприємства з високими вимогами до швидкості та затримок. Вони забезпечують ультранадійний зв'язок (latency менше 5 мс) та підтримку великої кількості пристроїв — до мільйона на квадратний кілометр. Такі мережі використовуються для інтеграції AR-окулярів персоналу, керування дронами для огляду ЛЕП та автономного транспорту (AGV). Обладнання рівня Nokia

					КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

DAC або Ericsson Private 5G Core дозволяє створювати повністю локальні мережі зв'язку, що вже тестуються на великих промислових об'єктах, зокрема в металургії.

ZigBee PRO / WirelessHART

Ці технології призначені для побудови енергоефективних mesh-мереж, які самостійно організовуються та можуть розширюватися через проміжні вузли. Радіус дії одного сегмента становить приблизно 100 м, а з ретрансляцією — до 1 км. Швидкість передачі даних обмежена (до 250 кбіт/с), однак затримка залишається низькою — близько 15 мс. Основна сфера застосування — промислові датчики тиску, температури та параметрів технологічних резервуарів. У процесній промисловості часто використовується стандарт WirelessHART або ISA100.11a, що забезпечує сумісність і надійність у складних умовах експлуатації.

1.4.4 Мережеві топології.

Розглянувши обидві технології з'єднання мереж, тепер треба розібратися в мережевих топологіях.

У промислових системах керування мережеві комутатори з'єднуються між собою за допомогою спеціалізованих кабелів, таких як Cat6a STP або оптоволоконні лінії з роз'ємами LC. Такі рішення застосовуються для формування надійної мережевої інфраструктури з резервуванням каналів зв'язку, що є критично важливим для автоматизованих систем керування енергопостачанням. Вибір топології мережі безпосередньо впливає на її стійкість до відмов, механічних пошкоджень та аварійних ситуацій.

Топологія «Зірка»

У топології «зірка» всі вузли мережі підключаються безпосередньо до центрального комутатора (core switch). До нього можуть бути під'єднані ПЛК, контролери IED та сервери SCADA за допомогою мідних або оптоволоконних ліній. Логічно така мережа працює як класичний Ethernet із використанням механізмів STP/RSTP для запобігання мережевим петлям.

					КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

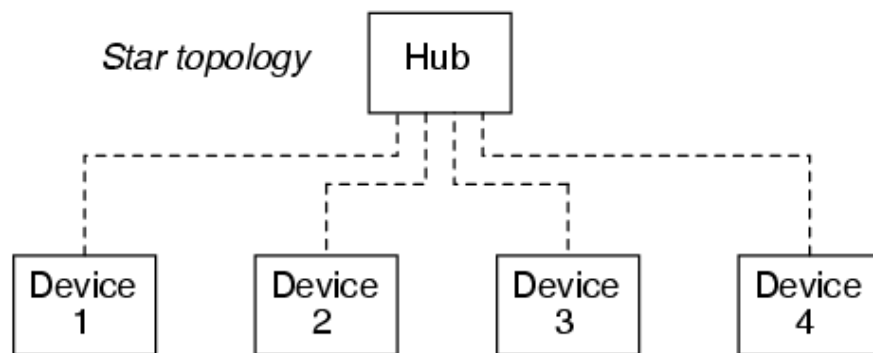


Рисунок 1.10 Схема топології «Зірка»

Основною перевагою цієї топології є простота масштабування та зручність діагностики, оскільки відмова окремого каналу впливає лише на один пристрій. Водночас суттєвим недоліком є наявність єдиної точки відмови — вихід з ладу центрального комутатора призводить до повної зупинки сегмента мережі, що є неприйнятним для енергетичних об'єктів.

Топологія «Кільце» (Ring)

Кільцева топологія широко застосовується в промислових мережах і регламентується стандартами, зокрема IEC 62439. У цій структурі комутатори з'єднані послідовно, утворюючи замкнуте кільце, найчастіше з використанням оптоволоконних ліній для підвищення надійності та швидкості передачі даних.

Ring topology

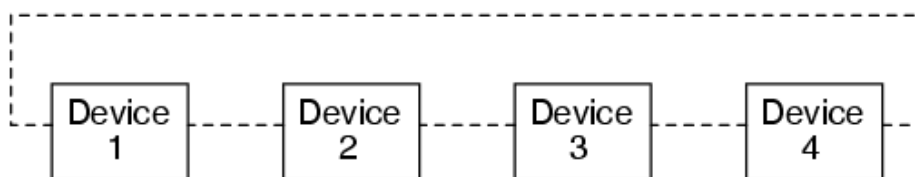


Рисунок 1.11 Схема топології «Кільце»

У нормальному режимі роботи частина портів логічно блокується для запобігання петель, а мережа функціонує як деревоподібна структура. У разі обриву кабелю система автоматично перебудовує маршрут передачі даних, забезпечуючи резервний шлях у зворотному напрямку. Час відновлення залежить від протоколу та може становити від кількох мілісекунд до сотень мілісекунд.

Для реалізації кільцевих топологій використовуються такі протоколи, як MRP (зі швидкістю відновлення до 20 мс), RSTP (приблизно 50-300 мс) або

PRP/HSR, які забезпечують безперервність зв'язку без часу перемикання за рахунок дублювання каналів.

1.5 Формулювання вимог до інформаційної підсистеми обміну даними

Проектування інформаційної підсистеми обміну даними є одним із ключових етапів створення автоматизованої системи керування енергопостачанням (АСКЕ) сучасного промислового підприємства. Дана підсистема виконує роль «нервової системи» об'єкта, забезпечуючи безперервну взаємодію між польовим обладнанням, контролерами та диспетчерським рівнем керування. На основі аналізу структури енергоспоживання, умов експлуатації та сучасних технологій промислової автоматизації сформульовано комплекс функціональних і технічних вимог до проєктованої системи.

1.5.1 Функціональні вимоги до підсистеми

Основною метою інформаційної підсистеми є забезпечення безперервного, надійного та структурованого обміну даними між усіма рівнями АСКЕ. Вона повинна гарантувати своєчасне отримання, обробку та передачу технологічної інформації в реальному часі.

До основних функціональних вимог належать:

1. Збір та передача телеметричних даних. Підсистема повинна забезпечувати отримання параметрів електричної мережі (струм, напруга, потужність, коефіцієнт потужності тощо) від інтелектуальних лічильників, датчиків та пристроїв релейного захисту. Передача даних має здійснюватися з інтервалами, достатніми для оперативного моніторингу стану енергосистеми в режимі реального часу.
2. Передача аварійних та попереджувальних сигналів. Усі зміни стану комутаційного обладнання, а також спрацювання захистів повинні негайно передаватися на диспетчерський рівень. Такі повідомлення

					КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

мають найвищий пріоритет у мережі та не можуть затримуватися фоновим трафіком.

3. Функції дистанційного керування. Підсистема повинна забезпечувати передачу команд керування від диспетчера до виконавчих пристроїв (вимикачів, роз'єднувачів тощо). Обов'язковим є використання механізмів підтвердження команд, зокрема логіки «вибір перед виконанням», що мінімізує ризик помилкових операцій.
4. Синхронізація часу. Усі пристрої системи повинні бути синхронізовані за єдиним джерелом часу (NTP або PTP). Точність синхронізації повинна становити не гірше 1 мс, що є критичним для аналізу аварійних процесів та формування хронології подій.

1.5.2 Вимоги до надійності та мережевої архітектури

Енергетичне підприємство характеризується безперервним технологічним процесом, тому вимоги до надійності інформаційної підсистеми є підвищеними.

Мережа повинна бути побудована таким чином, щоб виключити наявність єдиної точки відмови. Використання лінійної або простої зіркоподібної топології для магістральних з'єднань є недоцільним через низьку стійкість до пошкоджень.

Основною архітектурою повинна виступати кільцева топологія (Ring) із підтримкою протоколів швидкого відновлення зв'язку (MRP, RSTP або їх аналогів). У разі обриву лінії мережа повинна автоматично перебудовувати маршрути передачі даних, забезпечуючи час відновлення не більше 50 мс.

Магістральні з'єднання між підстанціями та диспетчерським центром повинні виконуватися виключно на основі волоконно-оптичних ліній зв'язку. Це забезпечує повну гальванічну розв'язку та високу стійкість до електромагнітних завад, які є характерними для умов металургійного виробництва.

Крім того, мережеве обладнання повинно підтримувати резервування живлення від двох незалежних джерел, що підвищує загальну відмовостійкість системи.

1.5.3 Вимоги до апаратного забезпечення

Умови експлуатації на промисловому підприємстві є складними, тому до мережевого обладнання висуваються спеціальні вимоги.

Пристрої повинні стабільно працювати в розширеному температурному діапазоні від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ без використання активного охолодження. Конструктивне виконання має передбачати металеві корпуси з можливістю монтажу на DIN-рейку.

Рівень захисту корпусу повинен відповідати не нижче IP30, а для зовнішніх або особливо агресивних умов — до IP65–IP67.

Окремо необхідно забезпечити відповідність вимогам електромагнітної сумісності згідно з міжнародними стандартами IEC 61000-6-2 та IEC 61000-6-4, що гарантує стійкість до промислових завад.

1.5.4 Вимоги до протоколів та інформаційної сумісності

Оскільки на підприємстві використовується обладнання різних поколінь, підсистема повинна підтримувати багатопроTOCOLьну взаємодію.

Для інтеграції з верхнім рівнем (SCADA, MES, ERP) застосовуються сучасні стандарти OPC UA та Modbus TCP, які забезпечують гнучкість і масштабованість.

Для швидкого обміну між пристроями релейного захисту використовується стандарт IEC 61850, зокрема механізми GOOSE та Sampled Values, що дозволяють передавати критичні події з мінімальною затримкою.

На нижньому рівні допускається використання Modbus RTU для підключення інтелектуальних лічильників і датчиків.

1.5.5 Вимоги до інформаційної безпеки

Інформаційна підсистема енергопостачання належить до критичної інфраструктури, тому питання безпеки є пріоритетним.

					КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Мережа АСКЕ повинна бути логічно або фізично ізольована від корпоративної ІТ-інфраструктури підприємства. Рекомендується використання VLAN-сегментації та міжмережевих екранів.

Усе мережеве обладнання повинно підтримувати захищені протоколи керування (SSH, HTTPS, SNMPv3), а також механізми аутентифікації користувачів. Додатково повинна бути реалізована система моніторингу стану мережі в реальному часі для оперативного виявлення несправностей.

1.5.6 Вимоги до масштабованості

Проектована підсистема повинна мати можливість подальшого розширення без суттєвої зміни архітектури. Розрахунковий горизонт масштабування становить не менше 10 років.

Для цього необхідно передбачити резервування портів на комутаторах (щонайменше 20–30%), підтримку додавання нових вузлів без простою системи, а також сумісність із майбутніми версіями мережевих протоколів.

– Таким чином, сформульовані вимоги визначають комплексну основу для побудови надійної інформаційної підсистеми обміну даними, яка забезпечить стабільну роботу АСКЕ в умовах великого промислового підприємства та дозволить інтегрувати обладнання різних поколінь в єдину керовану систему

Висновки за розділом:

У першому розділі було проаналізовано систему енергопостачання промислового підприємства як об'єкт автоматизації та розглянуто її багаторівневу структуру. Дослідження показало, що традиційні послідовні інтерфейси вже не забезпечують необхідної швидкодії та надійності обміну даними. Тому було розглянуто сучасні протоколи Modbus, IEC 61850, OPC UA та технологію Industrial Ethernet. За результатами аналізу сформовано основні вимоги до інформаційної підсистеми, зокрема використання волоконно-оптичних ліній зв'язку, високошвидкісного обміну даними та кільцевих топологій із резервуванням.

					<i>КНУ КРБ.151.26.05.01.ПЗ</i>	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ПРОЄКТУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ПІДСИСТЕМИ ОБМІНУ ДАНИМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯМ ПІДПРИЄМСТВА

2.1 Розробка структури автоматизованої системи керування енергопостачанням.

Для забезпечення надійного контролю, технічного обліку та оперативного управління енергосподарством умовного підприємства розробляється трирівнева структура автоматизованої системи керування енергопостачанням (АСКЕ).

В основу архітектури системи покладено принцип ієрархічності та децентралізації, що дозволяє збирати інформацію безпосередньо у місцях її виникнення (на підстанціях) та передавати її на центральний диспетчерський пункт.

Відповідно до структури, розглянутої у першому розділі роботи, система включає наступні рівні:

1. Нижній рівень: Призначений для вимірювання параметрів електричної мережі (струм, напруга, частота, потужність, коефіцієнт потужності) та захисту силового обладнання. На цьому рівні застосовуються інтелектуальні електронні пристрої (IED), зокрема мікропроцесорні пристрої релейного захисту та автоматики й цифрові лічильники електроенергії з комунікаційними інтерфейсами.
2. Середній рівень: рівень представлений програмованими логічними контролерами (ПЛК) та комунікаційними шлюзами, що

					<i>КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ</i>		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>РОЗДІЛ 2</i>		
<i>Розроб.</i>		<i>Баишта М.П.</i>					
<i>Перевір.</i>		<i>Тронь В.В.</i>					
<i>Н. Контр.</i>		<i>Маринич І.А.</i>					
<i>Затверд.</i>		<i>Маринич І.А.</i>			<i>КНУ АКІТ-22</i>		
					<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
						36	37

що встановлюються на підстанціях. Вони опитують пристрої нижнього рівня, збирають і обробляють дані, фіксують події та передають інформацію на верхній рівень через мережу Industrial Ethernet. Крім того, ПЛК забезпечують передачу команд керування від диспетчера до пристроїв релейного захисту та автоматики.

3. Верхній рівень: Розгортається в центральному диспетчерському пункті підприємства та включає серверне обладнання (сервер SCADA-системи та сервер баз даних), а також автоматизовані робочі місця оперативно-диспетчерського персоналу. На цьому рівні здійснюється візуалізація технологічного процесу у вигляді мнемосхем, відображення аварійної сигналізації, ведення архівів та формування звітної інформації щодо енергоспоживання.

У роботі розглядається умовне підприємство, система енергопостачання якого включає три основні об'єкти: головну знижувальну підстанцію (ГЗП) 110/10 кВ, розподільчий пункт 10 кВ у Цеху №1 (РП-1) та розподільчий пункт 10 кВ у Цеху №2 (РП-2).

Головна знижувальна підстанція є центральним елементом енергосистеми підприємства. До її складу входять наступні пристрої:

- Блоки РЗА: Необхідно контролювати 2 ввідні трансформатори та 6 ліній відхідних фідерів. Разом: 8 пристроїв РЗА;
- Лічильники електроенергії: Для точного технічного обліку на кожній лінії потрібні комерційні трифазні лічильники. Разом: 8 лічильників;
- Середній рівень: 1 шафа автоматизації з 1 потужним ПЛК;
- Мережа: 1 промисловий комутатор на 24 порти для об'єднання всього в локальну мережу підстанції.

Розподільчі пункти №1 та №2 будуть мати такі ж пристрої, але в меншій кількості:

- Блоки РЗА: 4 пристрої. (1 ввідний та 3 відхідні фідери до цехових трансформаторів);

					<i>КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ</i>	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Лічильників: 4 пристрої;
- Середній рівень: 1 ПЛК середньої потужності;
- Мережа: 1 промисловий комутатор на 16 портів.

В центральному диспетчерському пункті (верхній рівень) будуть знаходитися наступні пристрої:

- Сервер АСКЕ: 2 одиниці (Основний та Резервний для забезпечення відмовостійкості системи).
- АРМ Диспетчера-енергетика: 2 комп'ютери (робочі місця для оперативного чергового та головного енергетика).
- Мережа: 1 центральний керований комутатор/маршрутизатор (L3-рівня, наприклад, Cisco Catalyst), який збиратиме оптичні кабелі від усіх підстанцій.

Маючи таку архітектуру та пристрої складемо приблизну схему АСКЕ.

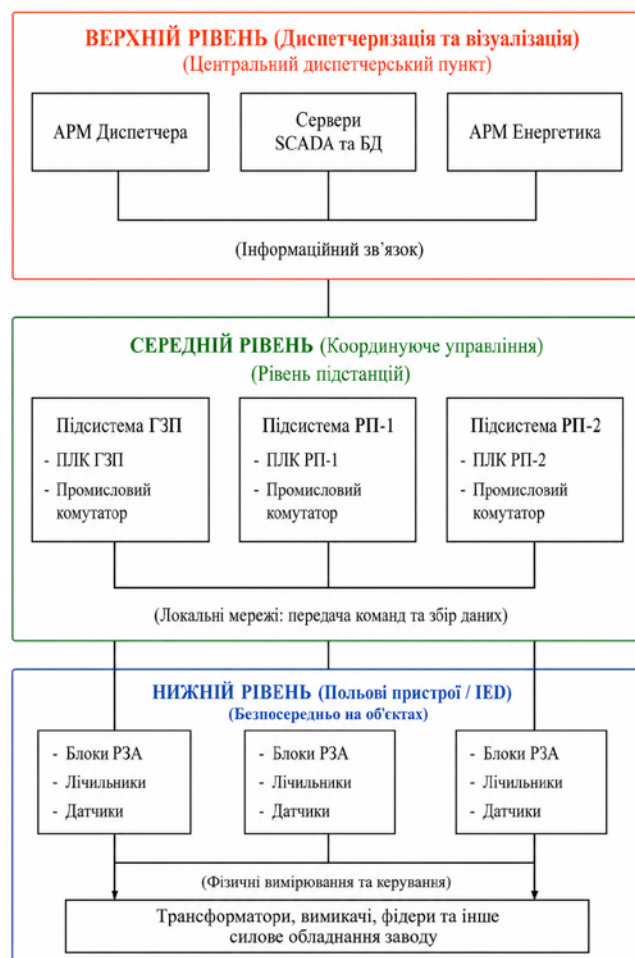


Рисунок 2.1 Структурна схема АСКЕ

2.2 Вибір архітектури інформаційної підсистеми передачі даних

Основою надійного функціонування інформаційної підсистеми обміну даними автоматизованої системи керування електропостачанням підприємства є раціонально спроектована мережева архітектура. До подібних систем висуваються підвищені вимоги щодо швидкості передачі критично важливої інформації, надійності роботи, відмовостійкості та можливості подальшого масштабування в умовах великого промислового підприємства металургійної галузі.

Під час проектування мережевої інфраструктури для Головної знижувальної підстанції (ГЗП) та розподільчих пунктів (РП-1, РП-2) було розглянуто два основних варіанти побудови системи обміну даними.

Перший варіант передбачає використання класичної архітектури на базі послідовних шин зв'язку. У цьому випадку для опитування терміналів релейного захисту та автоматики (РЗА), а також цифрових лічильників використовується інтерфейс RS-485 із протоколом Modbus RTU. Зібрана інформація передається через ПЛК-шлюз на верхній диспетчерський рівень системи.

Другий варіант базується на концепції «цифрової підстанції», де на всіх рівнях керування застосовується мережа Industrial Ethernet. У такій архітектурі інтелектуальні електронні пристрої підключаються безпосередньо до промислових комутаторів, що забезпечує швидший та більш гнучкий обмін даними між усіма елементами системи.

Для обґрунтування вибору оптимального рішення було проведено порівняльний аналіз обох архітектур за основними технічними критеріями. Результати цього аналізу наведено в таблиці 2(40с.).

					<i>КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ</i>	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1 Порівняльна характеристика мережесих архітектур.

Критерій оцінки	Класична архітектура (RS-485)	Топологія «Цифрова підстанція» (Industrial Ethernet)
Швидкість передачі даних	Низька (до 115 кбіт/с)	Висока (100 Мбіт/с – 1 Гбіт/с)
Топологія нижнього рівня	Послідовна шина («гірлянда»)	Паралельна («зірка»)
Вплив відмови одного пристрою	Може призвести до втрати зв'язку з усією лінією	Не впливає на роботу інших пристроїв
Можливість резервування	Ускладнена	Висока (кільцеві топології, протокол STP)
Складність інтеграції зі SCADA	Потребує складного налаштування маршрутизації в ПЛК	Прямий доступ до кожного пристрою за IP-адресою

Для проектованої системи було обрано другий варіант архітектури, побудований на основі стандарту IEC 61850 та технології Industrial Ethernet. Відмова від послідовного опитування пристроїв через інтерфейс RS-485 на користь паралельного підключення ПЛК, мікропроцесорних пристроїв релейного захисту та цифрових лічильників до локальних промислових комутаторів дозволила реалізувати топологію типу «зірка» на нижньому рівні системи.

Застосування такої архітектури забезпечує низку важливих переваг. Насамперед це зменшення затримок під час передавання даних, оскільки кожен пристрій має власну IP-адресу та окремий канал зв'язку, що дозволяє значно підвищити швидкість обміну інформацією та оперативність передавання команд керування. Крім того, підвищується відмовостійкість

					КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

системи, адже пошкодження лінії зв'язку або вихід з ладу окремого пристрою не впливає на роботу інших вузлів мережі.

Для організації магістрального зв'язку промислові комутатори Головної знижувальної підстанції (ГЗП), а також розподільчих пунктів РП-1 та РП-2 об'єднуються між собою в оптичне кільце. Така топологія забезпечує резервування каналів зв'язку та безперервність передавання даних навіть у випадку пошкодження однієї з ділянок мережі.

Додатковою перевагою обраної архітектури є спрощення інтеграції з SCADA-системою, оскільки диспетчерський рівень отримує можливість безпосереднього доступу до будь-якого пристрою підстанції без використання додаткових шлюзів або перетворювачів протоколів.

Таким чином, використання архітектури на базі Industrial Ethernet та IEC 61850 повністю відповідає вимогам сучасних автоматизованих систем керування енергопостачанням промислових підприємств і створює надійну основу для подальшого проєктування та моделювання мережевої інфраструктури.

2.3 Вибір мережевих технологій та протоколів передачі даних

Для забезпечення надійної та безперебійної роботи інформаційної підсистеми обміну даними автоматизованої системи керування електропостачанням(АСКЕ) необхідно обґрунтувати вибір фізичного середовища передавання даних та мережевих протоколів.

2.3.1 Вибір фізичного середовища передачі даних.

Під час вибору фізичного середовища передавання даних враховувалися особливості промислового об'єкта, зокрема наявність високовольтного обладнання, силових трансформаторів і фідерів, які створюють значний рівень електромагнітних завад. З цієї причини для побудови мережевої інфраструктури було застосовано комбінований підхід.

					КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для організації зв'язку між підстанціями та диспетчерським пунктом використано волоконно-оптичні лінії зв'язку стандарту 1000Base-LX. Оптичний кабель характеризується високою завадостійкістю, забезпечує гальванічну розв'язку між віддаленими об'єктами та підтримує швидкість передавання даних до 1 Гбіт/с, що є достатнім для передачі телеметричної інформації та службових повідомлень між ГЗП, РП-1, РП-2 і диспетчерським центром.

На рівні підстанцій для підключення мікропроцесорних пристроїв релейного захисту та автоматики, програмованих логічних контролерів і цифрових лічильників до промислових комутаторів використовується екранована вита пара категорії 5е стандарту 100Base-TX. Наявність екранування дозволяє зменшити вплив локальних електромагнітних завад, а пропускна здатність 100 Мбіт/с повністю задовольняє вимоги польового рівня автоматизації.

Для підвищення надійності мережі в комутаторах передбачено використання протоколу Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP). У разі пошкодження однієї з ділянок оптичного кільця протокол автоматично перебудовує маршрути передавання даних та відновлює зв'язок за мінімальний час, що дозволяє уникнути втрати критично важливої інформації та забезпечити безперервну роботу системи.

2.3.2 Вибір протоколів прикладного рівня

Оскільки проєктована автоматизована система керування електропостачанням реалізується відповідно до концепції цифрової підстанції, основою обміну даними обрано міжнародний стандарт IEC 61850. Його використання дозволяє організувати інформаційний обмін між пристроями енергетичного об'єкта та розподілити потоки даних залежно від їхнього призначення і рівня важливості.

Для швидкого обміну повідомленнями між мікропроцесорними пристроями релейного захисту застосовується протокол GOOSE. Він забезпечує передачу аварійних сигналів і команд керування безпосередньо

					<i>КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ</i>	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

між пристроями через мережу Ethernet, минаючи центральний сервер. Завдяки цьому досягається мінімальний час затримки, що є особливо важливим для роботи систем захисту та автоматики.

Для взаємодії між пристроями польового рівня та серверним обладнанням верхнього рівня використовується протокол MMS. За його допомогою здійснюється передача поточних вимірювань, архівних даних, звітів, журналів подій та іншої технологічної інформації до SCADA-системи.

Оскільки частина встановлених на підприємстві цифрових лічильників не підтримує стандарт IEC 61850, для їх інтеграції до єдиної мережі передбачено використання протоколу Modbus TCP. Він функціонує поверх стандартних мереж Ethernet/IP і дозволяє організувати збір даних без застосування додаткових інтерфейсних перетворювачів.

Таким чином, поєднання технології Industrial Ethernet, механізмів резервування мережі та протоколів IEC 61850 і Modbus TCP забезпечує необхідний рівень швидкодії, надійності та масштабованості інформаційної підсистеми автоматизованої системи керування електропостачанням.

2.4 Розробка топології комп'ютерної мережі системи керування

Для забезпечення надійного та безперебійного функціонування інформаційної підсистеми АСКЕ необхідно розробити відмовостійку мережеву топологію, що відповідає вимогам промислових стандартів і забезпечує високу стабільність обміну даними.

Організація зв'язку між центральним диспетчерським пунктом та підстанціями підприємства реалізується на основі комбінованої мережевої архітектури.

На магістральному рівні використовується кільцева топологія, в якій центральний комутатор диспетчерської (Central_Switch) та промислові комутатори підстанцій (Switch_HZP, Switch_RP1, Switch_RP2) з'єднані у волоконно-оптичне кільце. Застосування протоколу швидкого резервування

					<i>КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

RSTP забезпечує автоматичне відновлення працездатності мережі у разі пошкодження одного з каналів зв'язку, що підвищує загальну відмовостійкість системи.

На рівні підстанцій застосовується топологія «зірка», де всі кінцеві інтелектуальні пристрої (мікропроцесорні термінали релейного захисту, програмовані логічні контролери та цифрові лічильники) підключаються до локального комутатора окремими каналами на основі екранованої витой пари. Такий підхід дозволяє локалізувати можливі відмови, оскільки вихід з ладу одного пристрою або лінії зв'язку не впливає на функціонування інших елементів підстанції.

Логічна структура спроектованої мережі із відображенням ієрархії вузлів та напрямків потоків даних наведена на рисунку нижче(рис.2.2, с).

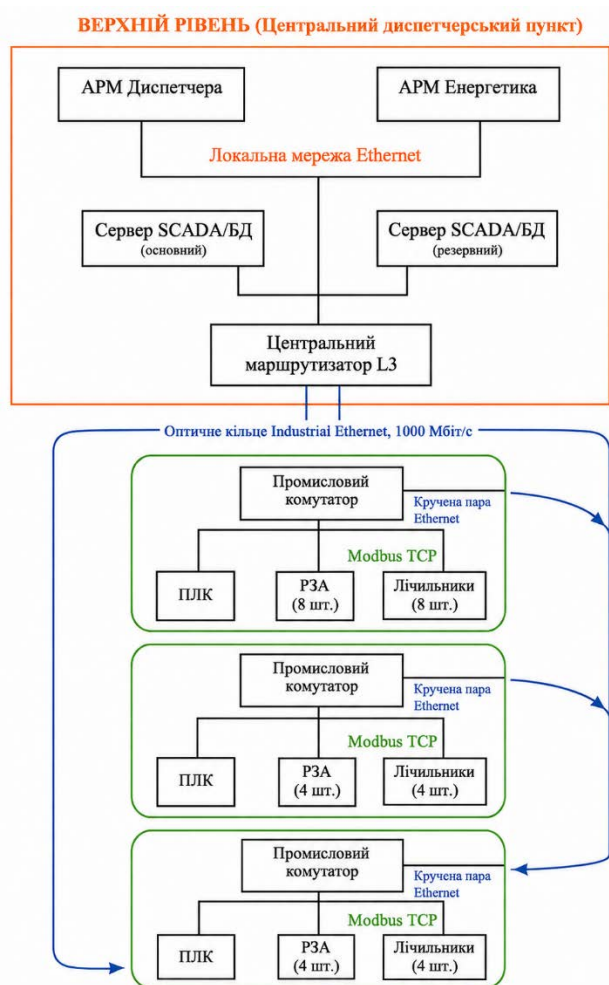


Рисунок 2.2 Структурна схема комп'ютерної мережі інформаційної підсистеми АСКЕ

Для верифікації проєктних рішень, перевірки коректності обраної топології та тестування надійності обміну даними було розроблено імітаційну модель комп'ютерної мережі у спеціалізованому програмному середовищі Cisco Packet Tracer.

З метою спрощення візуалізації імітаційної моделі в середовищі Cisco Packet Tracer на кожній підстанції представлено по одному інтелектуальному пристрою кожного типу (ПЛК, РЗА, лічильник електроенергії). Вони логічно репрезентують повну групу пристроїв відповідного призначення, що функціонують на об'єкті, оскільки інформаційні потоки та принципи маршрутизації є ідентичними для всіх пристроїв одного типу.

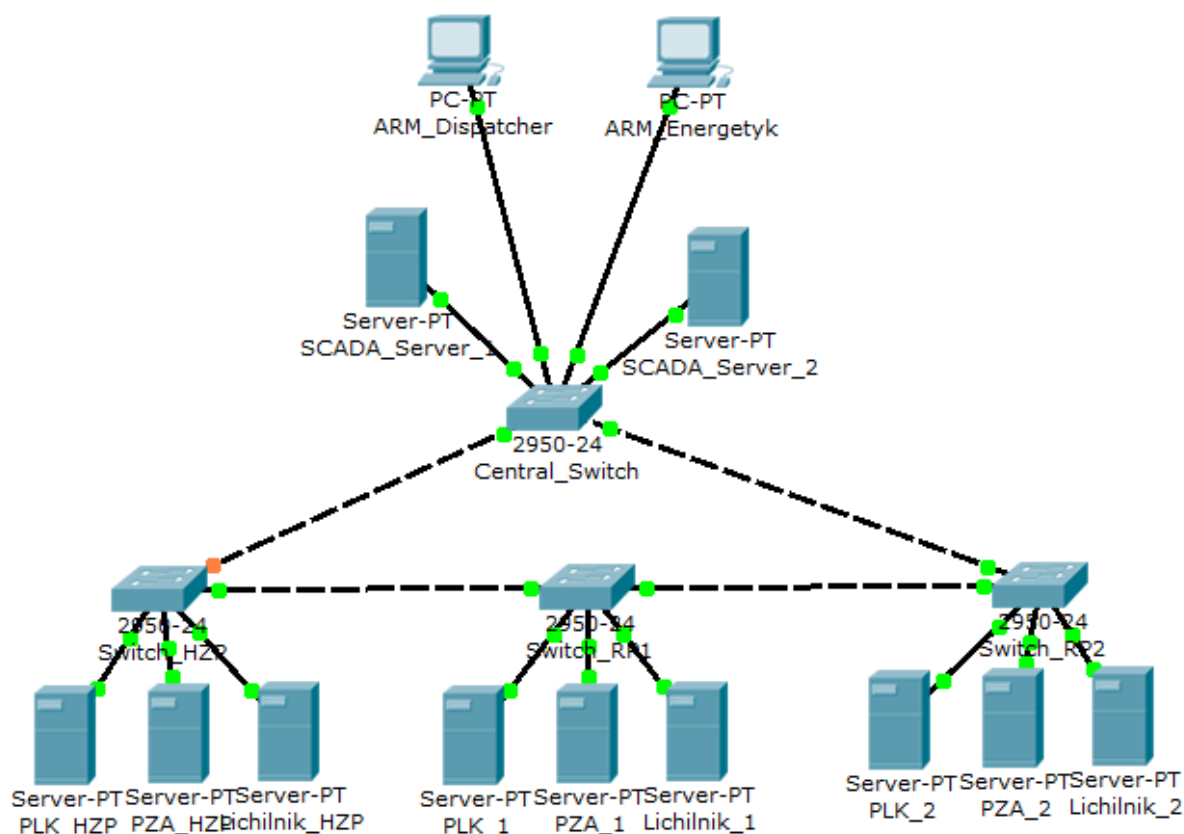


Рисунок 2.3 Імітаційна модель мережі АСКЕ у середовищі Cisco Packet Tracer.

Наступним кроком апаратної реалізації є організація єдиного адресного простору. Для інформаційної підсистеми обрано статичну IPv4-адресацію в межах локальної підмережі класу С. Статична схема адресації є обов'язковою вимогою для промислових мереж (на відміну від динамічного призначення

адрес через DHCP), оскільки SCADA-система та пристрої релейного захисту і автоматики (РЗА) повинні мати фіксовані, незмінні IP-адреси для забезпечення гарантованої доставки критично важливих повідомлень за протоколами IEC 61850 та Modbus TCP.

План розподілу IP-адрес для всіх активних вузлів розробленої імітаційної моделі наведено у таблиці 3.

Таблиця 2.2 Параметри адресації вузлів інформаційної підсистеми АСКЕ

Назва вузла на схемі	Призначення обладнання	IP-адреса	Маска підмережі
SCADA_Server_1	Основний сервер БД та SCADA	192.168.1.10	255.255.255.0
SCADA_Server_2	Резервний сервер БД та SCADA	192.168.1.11	255.255.255.0
ARM_Dispatcher	Робоче місце диспетчера	192.168.1.12	255.255.255.0
ARM_Energetyk	Робоче місце головного енергетика	192.168.1.13	255.255.255.0
PLK_HZP	Контролер Головної знижувальної підстанції	192.168.1.51	255.255.255.0
PZA_HZP	Блок релейного захисту ГЗП	192.168.1.52	255.255.255.0

Назва вузла на схемі	Призначення обладнання	ІР-адреса	Маска підмережі
Lichilnik_HZP	Цифровий лічильник електроенергії ГЗП	192.168.1.53	255.255.255.0
PLK_1	Контролер Розподільчого пункту 1 (РП-1)	192.168.1.61	255.255.255.0
PZA_1	Блок релейного захисту РП-1	192.168.1.62	255.255.255.0
Lichilnik_1	Цифровий лічильник електроенергії РП-1	192.168.1.63	255.255.255.0
PLK_2	Контролер Розподільчого пункту 2 (РП-2)	192.168.1.71	255.255.255.0
PZA_2	Блок релейного захисту РП-2	192.168.1.72	255.255.255.0
Lichilnik_2	Цифровий лічильник електроенергії РП-2	192.168.1.73	255.255.255.0

					<i>КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

Задана конфігурація IP-адрес та побудована топологія повністю забезпечують логічну зв'язність усіх елементів системи та створюють основу для проведення імітаційних випробувань мережі щодо швидкодії та відмовостійкості.

2.5. Моделювання та оцінювання параметрів обміну даними

Для перевірки проектних рішень була розроблена імітаційна модель у середовищі Cisco Packet Tracer. Створена модель відтворює повний стек активного мережевого обладнання диспетчерського центру та три підсистеми об'єктів енергопостачання. Основною метою даного етапу є перевірка логічної зв'язності всіх вузлів мережі, а також аналіз її відмовостійкості в умовах виникнення аварійних ситуацій.

2.5.1. Перевірка наскрізної передачі даних

Першим кроком дослідження стала перевірка наскрізної передачі даних між верхнім та нижнім рівнями системи. Для цього з автоматизованого робочого місця диспетчера (ARM_Dispatcher) було ініційовано серію ICMP-запитів (команда ping) до найбільш віддаленого вузла мережі — цифрового лічильника електроенергії, розташованого на розподільчому пункті 2 (Lichilnik_2 з IP-адресою 192.168.1.73).

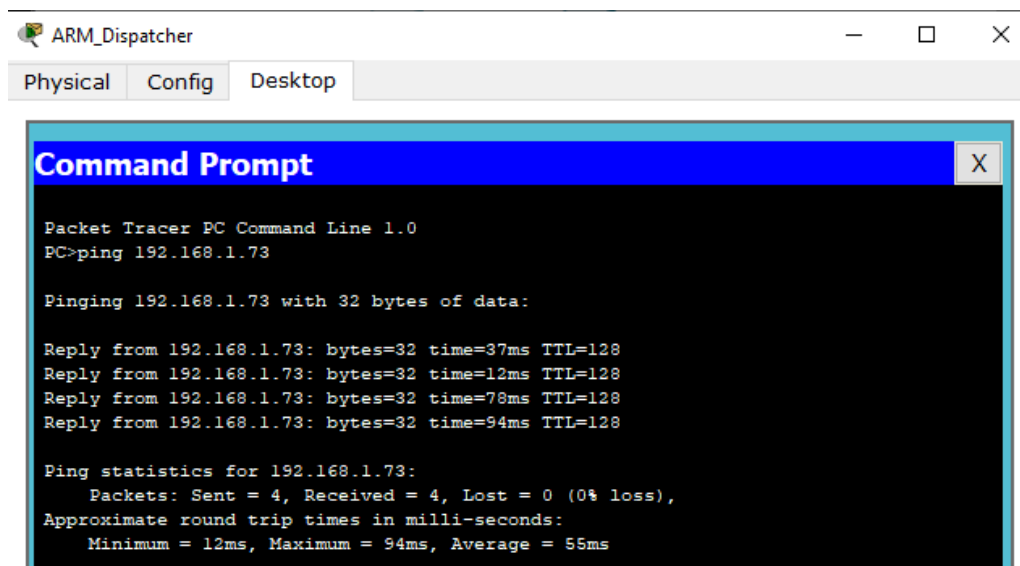


Рисунок 2.4 Результати перевірки логічного зв'язку мережі (Ping)

					КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Результати проведеного тестування свідчать, що всі передані пакети були успішно доставлені до вузла призначення та повернуті без втрат (0% втрат пакетів). Середній час затримки (Average) становив 55 мс, що є допустимим показником для передачі телеметричних даних та організації системи опитування цифрових лічильників.

Отримані результати підтверджують коректність налаштування статичної IP-адресації та базових параметрів маршрутизації в мережевому обладнанні системи.

2.5.2. Перевірка відмовостійковтї оптичного кільця

Другим етапом виконано перевірку відмовостійкості магістрального оптичного кільця. Відповідно до вимог до промислових мереж АСКЕ, порушення цілісності одного з каналів зв'язку не повинно призводити до втрати керування підстанціями. Для моделювання аварійної ситуації в імітаційній моделі було штучно розірвано магістральне з'єднання між комутаторами підстанцій РП-1 (Switch_RP1) та РП-2 (Switch_RP2)(рис.2.5, с.).

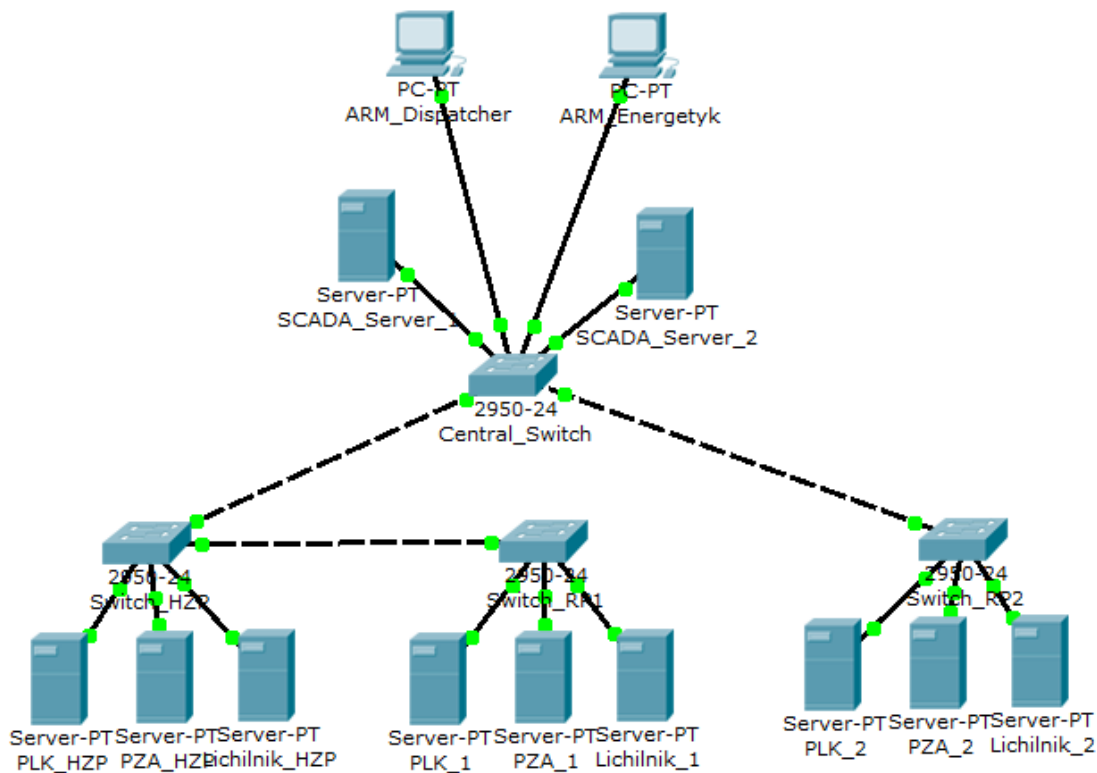


Рисунок 2. Імітація обриву магістральної лінії зв'язку та робота протоколу RSTP

Результати моделювання показали, що протокол швидкого резервування RSTP (IEEE 802.1w) оперативно відреагував на зміну топології мережі. Резервний порт, який до цього перебував у стані очікування, автоматично перейшов в активний режим і забезпечив перенаправлення трафіку в обхід пошкодженої ділянки. При цьому індикатори стану каналів зв'язку залишилися активними, а вузли підстанції РП-2 не втратили логічний зв'язок із центральним SCADA-сервером, що підтверджує коректність налаштування IP-адресації та базову відмовостійкість розробленої мережевої топології.

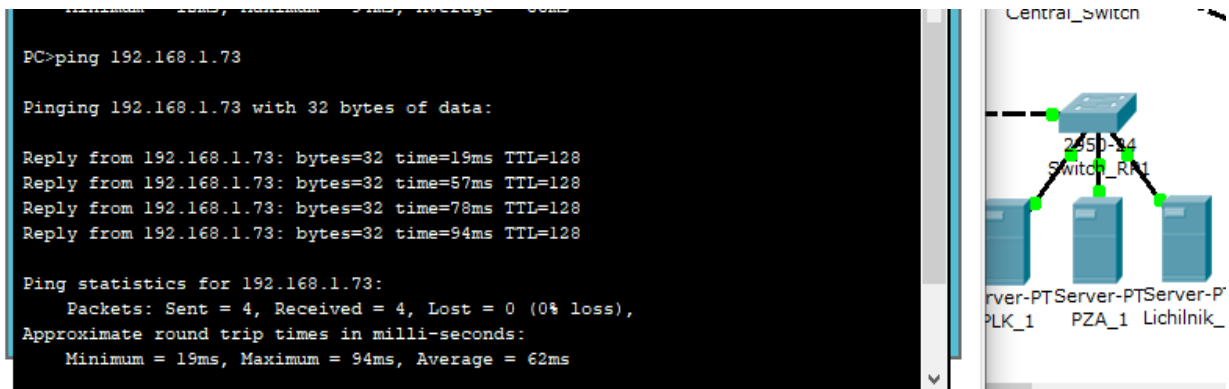


Рисунок 2.6 Успішна передача даних резервним маршрутом після спрацювання протоколу RSTP

2.5.3. Оцінка інформаційного навантаження на мережу підсистеми

Для перевірки достатності пропускної здатності розробленої мережевої архітектури виконано аналітичну оцінку очікуваного інформаційного навантаження.

У спроектованій системі передбачається передавання таких типів даних:

- регулярна телеметрія від цифрових лічильників за протоколом Modbus TCP;
- оперативні вимірювання та сигнали від мікропроцесорних терміналів РЗА за протоколом MMS (IEC 61850);
- критичні події повідомлення релейного захисту (GOOSE);
- службовий трафік SCADA-системи, включно з перевіркою зв'язку (ICMP) та службовими повідомленнями протоколу резервування RSTP.

Відповідно до розробленої структури об'єкта, система в цілому включає 32 інтелектуальні польові пристрої: 16 на ГЗП та по 8 на РП-1 і РП-2.

Припустимо, що в нормальному режимі роботи кожен пристрій передає один пакет даних обсягом приблизно 800 байт (з урахуванням службових заголовків Ethernet/IP) щосекунди. У такому випадку середнє навантаження від одного вузла становить:

$$800 \cdot 8 = 6400 \frac{\text{біт}}{\text{с}} = 6,4 \frac{\text{кбіт}}{\text{с}}$$

Для 32 пристроїв сумарне базове навантаження складе:

$$32 \cdot 6,4 = 204,8 \frac{\text{кбіт}}{\text{с}}$$

Враховуючи специфіку промислових мереж (можливі «шторми» GOOSE-повідомлень під час аварій, передавання осцилограм, запити SCADA-серверів та роботу механізмів резервування), доцільно передбачити резерв пропускної здатності на рівні 400–500 %. За таких умов розрахункове пікове навантаження на мережу не перевищує 1,0–1,2 Мбіт/с.

Отримане значення є незначним порівняно з пропускною здатністю локальних каналів 100Base-TX (100 Мбіт/с) і магістральних оптичних ліній 1000Base-LX (до 1 Гбіт/с). Таким чином, запропонована архітектура має значний запас продуктивності (використання становить менше 2 %), що виключає ризик затримок при передаванні телеметричних і аварійних даних АСКЕ.

2.6. Обґрунтування технічних рішень та рекомендації щодо впровадження

У процесі розробки інформаційної підсистеми обміну даними автоматизованої системи керування енергопостачанням (АСКЕ) було сформовано комплекс базових апаратно-програмних рішень. Виконане імітаційне моделювання підтвердило логічну зв'язність мережі та базову працездатність обраної топології, однак для повноцінної перевірки роботи

					КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

протоколів IEC 61850/GOOSE, оцінки реальних апаратних затримок та підтвердження промислової надійності обладнання при фізичному впровадженні на об'єкті необхідне додаткове детальне обґрунтування прийнятих підходів і технічних рішень.

2.6.1 Техніко-економічне обґрунтування прийнятих проєктних рішень

Запропонована архітектура мережі базується на низці ключових інновацій, які суттєво відрізняють її від традиційних систем збору телеметрії:

1. Перехід до архітектури Industrial Ethernet:

Відмова від застарілих послідовних інтерфейсів (таких як RS-485) на користь мереж сімейства Ethernet дозволила вирішити проблему пропускну здатності, яка є критичною для сучасних АСКЕ. Використання каналів зв'язку зі швидкістю 100 Мбіт/с та 1 Гбіт/с усуває інформаційні «вузькі місця» (bottlenecks) при одночасній передачі великих масивів даних: осцилограм аварійних подій, поточних вимірювань якості електроенергії та журналів подій із мікропроцесорних терміналів захисту.

2. Впровадження об'єктно-орієнтованого стандарту IEC 61850:

Використання протоколів цього стандарту докорінно змінює логіку функціонування релейного захисту. Завдяки технології передачі GOOSE-повідомлень безпосередньо на каналному рівні моделі OSI (без інкапсуляції в TCP/IP) досягається надвисока швидкодія. Інтелектуальні електронні пристрої (IED) отримують можливість обмінюватися сигналами блокування та відключення за час, що не перевищує 4 мс. Це є критично важливим для локалізації струмів короткого замикання та запобігання каскадним аваріям на об'єкті.

3. Забезпечення відмовостійкості на базі RSTP:

Організація магістрального оптичного кільця забезпечує високий рівень надійності на фізичному та каналному рівнях. Протокол Rapid Spanning Tree Protocol (IEEE 802.1w) виключає можливість

					<i>КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ</i>	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виникнення «широкомовних штормів» шляхом блокування резервних портів, водночас забезпечуючи автоматичне відновлення логічної зв'язності за частки секунди у разі обриву кабелю.

2.6.2 Рекомендації щодо впровадження в умовах діючого виробництва

Впровадження спроектованої підсистеми на реальних енергоємних об'єктах важкої промисловості пов'язане зі складними та жорсткими умовами експлуатації. З урахуванням цього, під час фізичного монтажу та проведення пусконаладжувальних робіт рекомендується дотримуватися таких технічних вимог:

- **Забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС):** Робота потужного силового обладнання (дугових печей, прокатних станів, трансформаторів великої потужності) супроводжується утворенням інтенсивних електромагнітних полів. З огляду на це, всі магістральні траси між знижувальною підстанцією та розподільчими пунктами повинні прокладатися виключно волоконно-оптичним кабелем із броньованим покриттям (для захисту від механічних пошкоджень і впливу гризунів). Локальні з'єднання в межах однієї підстанції мають виконуватися екранованою витотою парою (STP) з обов'язковим одностороннім заземленням екрану для запобігання виникненню контурних струмів.
- **Вимоги до апаратного забезпечення:** Активне мережеве обладнання (промислові комутатори, шлюзи) повинно мати індустріальне виконання. Це передбачає монтаж на DIN-рейку, пасивне охолодження (без вентиляторів, які можуть забиватися струмопровідним пилом), розширений діапазон робочих температур (від -40°C до +75°C) та рівень захисту корпусу не нижче IP30 для встановлення в електротехнічних шафах.
- **Резервування живлення:** Оскільки інформаційна мережа керує критичною інфраструктурою, усі комутатори та контролери

					<i>КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ</i>	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

повинні мати систему подвійного живлення (Dual Power Input). Рекомендується підключення обладнання до незалежних джерел постійного струму (наприклад, 24 В або 48 В) від щитів постійного струму підстанцій або використання промислових джерел безперебійного живлення (ДБЖ).

- Стратегія поетапної міграції: З огляду на безперервний характер металургійного виробництва, повне відключення системи для заміни обладнання є недопустимим. Рекомендується поетапна модернізація з використанням промислових шлюзів протоколів. Це дозволить інтегрувати застарілі лічильники та контролери, що працюють за протоколом Modbus RTU (RS-485), у нову Ethernet-інфраструктуру на перехідному етапі до повної заміни парку пристроїв.
- Кібербезпека технологічного сегмента: Відповідно до міжнародного стандарту IEC 62443, технологічна мережа АСКЕ повинна бути суворо ізольована від корпоративної офісної мережі підприємства. Для цього необхідно застосовувати апаратні міжмережеві екрани (Firewall) промислового класу, здатні виконувати глибоку інспекцію пакетів (DPI) специфічних промислових протоколів, таких як Modbus TCP та IEC 61850, із блокуванням будь-якого несанкціонованого зовнішнього трафіку.

4. Реалізація наведених рекомендацій дозволить мінімізувати технічні ризики на етапі впровадження, забезпечити стабільну роботу АСКЕ в умовах агресивного промислового середовища та створити надійну основу для подальшого масштабування системи.

Висновки до розділу:

У другому розділі розроблено інформаційну підсистему АСКЕ на основі концепції «цифрової підстанції» та технологій Industrial Ethernet. Імітаційне моделювання, проведене у середовищі Cisco Packet Tracer, підтвердило

					КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

коректність запропонованої мережевої топології, працездатність статичної IP-адресації вузлів та базову відмовостійкість мережі під час імітації обриву зв'язку завдяки використанню протоколу RSTP.

					<i>КНУ КРБ.151.26.05.02.ПЗ</i>	Арк.
						55
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-технічне завдання проєктування надійної та швидкодіючої інформаційної підсистеми обміну даними для автоматизованої системи керування енергопостачанням (АСКЕ) промислового підприємства. За результатами досліджень, проєктування та імітаційного моделювання сформульовано такі загальні висновки:

1. Встановлено, що традиційні мережеві рішення на базі послідовних інтерфейсів (RS-485) не забезпечують необхідної пропускну здатності та відмовостійкості в умовах сучасних промислових підприємств. Обґрунтовано доцільність переходу до концепції «цифрової підстанції» з використанням технологій Industrial Ethernet.

2. Розроблено багаторівневу ієрархічну структуру системи керування, яка забезпечує чіткий розподіл інформаційних потоків між польовим, середнім та верхнім рівнями, що підвищує ефективність обробки та передачі даних.

3. Обґрунтовано вибір стеку протоколів прикладного рівня, який забезпечує необхідні показники швидкодії та сумісності. Для критичних сигналів релейного захисту застосовано IEC 61850 (GOOSE), для взаємодії зі SCADA — MMS, для інтеграції цифрових лічильників — Modbus TCP.

4. Спроектовано комбіновану відмовостійку мережеву топологію з використанням волоконно-оптичного кільця (1000Base-LX) та механізмів резервування на основі RSTP (IEEE 802.1w), що забезпечує високу надійність передачі даних та автоматичне відновлення зв'язку при відмовах.

5. Розроблено імітаційну модель інформаційної підсистеми в середовищі Cisco Packet Tracer, яка підтвердила логічну зв'язність вузлів, коректність IP-адресації та базову працездатність запропонованої мережевої архітектури.

					КНУ КРБ.151.26.05.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Баишта М.П.			ВИСНОВКИі			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Тронь В.В.								56	2
								КНУ АКІТ-22			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

6. Моделювання аварійної ситуації у вигляді обриву магістральної лінії зв'язку підтвердило здатність протоколу RSTP здійснювати автоматичну перебудову логічних маршрутів, що забезпечує базову відмовостійкість системи на каналному рівні.

7. Проведене моделювання засвідчило, що спроектована мережева топологія та обраний стек протоколів забезпечують необхідний рівень логічної зв'язності та масштабованості для побудови сучасної інформаційної підсистеми АСКЕ.

Загалом результати дослідження свідчать, що розроблений проєкт формує надійну основу для модернізації мережевої інфраструктури підприємства. За умови використання сертифікованого промислового обладнання та практичного впровадження запропонованих рішень підсистема здатна забезпечити необхідний рівень швидкодії та відмовостійкості, сприяючи підвищенню ефективності керування енергетичними ресурсами.

					<i>КНУ КРБ.151.26.05.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Шкрабець Ф. П. Електропостачання та електрообладнання об'єктів гірничої промисловості : навч. посіб. Дніпро : НМУ, 2017. 195 с.
2. АрселорМіттал Кривий Ріг. *Вікіпедія: вільна енциклопедія*. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/АрселорМіттал_Кривий_Ріг
3. ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» – найбільше підприємство гірничо-металургійного комплексу України. *Головне управління статистики у Дніпропетровській області*. URL: <http://www.gs.dp.ua/language/uk/підприємства-області/пат-арселорміттал-кривий-ріг-найб.php>
4. Наказ від 17.04.2000 року N 32/28/28/276/75/54 Про затвердження Концепції побудови автоматизованих систем обліку електроенергії в умовах енергоринку.
5. Яндульський О. С., Степицький Б. П. Проектування автоматизованих систем керування в енергетиці : конспект лекцій. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 142 с.
6. АСУ ТП: Проектування та впровадження систем автоматизації. *Teredo*. URL: <https://teredo.com.ua/produksiya/asutp/>
7. Даніленко О. В. Автоматизовані системи керування технологічними процесами : конспект лекцій. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2012. 120 с.
8. Злотенко Б. М., Рожок С. В., Курганов В. В. Побудова систем керування на базі промислової мережі Modbus. *Технологія та дизайн*. 2016. № 2. С. 1–10.
9. Modbus. *Вікіпедія: свободная энциклопедия*. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Modbus>

					КНУ КРБ.151.26.05.00.ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Баишта М.П.			СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	Літ.		Арк.	Аркушів
Перевір.		Тронь В.В.						56	3
						КНУ АКІТ-22			
Н. Контр.		Маринич І.А.							
Затвердив		Маринич І.А.							

10. Що таке протокол Modbus і його особливості. *Сімап*. URL: <https://simat.com.ua/article-shho-take-protokol-modbus-i-jogo-osoblyvosti>
11. Що таке Modbus? Повний посібник. *A2M*. URL: <https://www.a2m.com.ua/ua/post/what-is-modbus-a-complete-guide>
12. Modbus у BMS: застосування та інтеграція з іншими системами. *MicroNet*. URL: <https://micronet.com.ua/modbus-u-bms-zastosuvannya-ta-integracziya-z-inshymy-systemamy/>
13. Автоматизовані системи керування та прогресивні інформаційні технології. *Вікіпедія: вільна енциклопедія*. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Автоматизовані_системи_керування_та_прогресивні_інформаційні_технології
14. Communication protocol IEC 61850 Tutorial Part 1. *Typhoon HIL*. URL: <https://www.typhoon-hil.com/videos/communication-protocol-iec-61850-tutorial-part-1/>
15. IEC 61850 – автоматизація підстанцій. *Oblik Online*. URL: <https://oblik.online/iec-61850-avtomatizatsiia-pidstantsii>
16. Технологія OPC UA. *Phoenix Contact*. URL: <https://www.phoenixcontact.com/uk-ua/tekhnolohiyi/tekhnolohiyi-zvyazku/opc-ua>
17. OPC UA. *Вікіпедія: свободная энциклопедия*. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/OPC_UA
18. Промислові мережеві рішення. *Lapp Ukraine*. URL: <https://lappukraine.lappgroup.com/galuzevi-rishennja/industrial-communication/merezhevi-rishennja.html>
19. Промислові комутатори Ethernet. *Optokon*. URL: https://optokon.ua/ua/catalog/industrial_switches
20. Розвінчання технології промислових комутаторів Ethernet: всеосяжний посібник. *Fiberroad*. URL: <https://fiberroad.com/uk/demystifying-industrial-ethernet-switch-technology-a-comprehensive-guide/>

21. Промислові мережі та інтерфейси. *Електронний навчальний курс ЛНТУ*. URL: <https://e-tk.lntu.edu.ua/mod/page/view.php?id=3543>
22. Industrial Ethernet. *Вікіпедія: вільна енциклопедія*. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Industrial_Ethernet
23. Застосування оптоволокна: ключові сфери використання. *Homenet*. URL: <https://homenet.online/zastosuvannya-optovolokna-klyuchovi-sferi-vikoristannya/>
24. Важливість оптоволокна в інфраструктурі та промисловості. *Onninen*. URL: <https://onninen.ua/stattya/vazlyvistb-optovolokna-v-infrastrukturi-ta-promyslovosti>
25. Промисловий бездротовий зв'язок. *Phoenix Contact*. URL: <https://www.phoenixcontact.com/uk-ua/produkcija/industrial-communication/industrial-wireless>
26. Semenov S., Saliiev A. Analysis of Wireless Communication Technologies in Industrial Automation. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. 2022. Vol. 1. No. 3. P. 135–144.
27. Промислове бездротове обладнання. *Proxis*. URL: <https://www.proxis.ua/uk/catalog/industrial-wireless-equipment/>
28. Цюцюра С. В., Цюцюра В. Д. Метрологія та вимірювальна техніка : навч. посіб. Київ : Знання, 2003. 242 с.
29. 5G. *Вікіпедія: вільна енциклопедія*. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/5G>
30. Моркун Н. В., Маринич І. А. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавру для студентів спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”. Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2019. 50 с.
31. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).

32. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с. (Інформація та документація).

33. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень в українській мові. Загальні вимоги та правила. Київ, ДП «УкрННЦ», 2013. 23 с. (Інформація та документація)

34. ДСТУ 3651.0-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення Київ, Держстандарт України, 1998. 27 с. (Інформація та документація)

					<i>КНУ КРБ.151.26.05.00.ПЗ</i>	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

					<i>КНУ КРБ.151.26.05.00.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		62

