

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра енергетики та електротехнічних систем

До захисту
Допускається
В.о. завідувача кафедри

Олександр ЮРЧЕНКО

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Дослідження надійності електропостачання систем оповіщення критичних об'єктів в умовах автономної роботи»

Виконав

(підпис)

Денис ГУЩА
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Група:

ЕТЕС 2401-1 М

Науковий керівник:

(підпис)

Ганна БАРСУКОВА
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:

(підпис)

Олена ДОВЖИК
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Суми – 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерно-технологічний

Кафедра енергетики та електротехнічних систем

Ступінь вищої освіти «Магістр»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
енергетики та електротехнічних систем

Андрій ЧЕПЖНИЙ

«5» вересня 2024 року

З А В Д А Н Н Я
на кваліфікаційну роботу
Дениса ГУЩІ
(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Дослідження надійності електропостачання систем оповіщення критичних об'єктів в умовах автономної роботи
2. Керівник кваліфікаційної роботи: Барсукова Ганна Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент
3. Строк подання здобувачем роботи: «14» листопада 2025 року.
4. Вихідні дані до роботи: паспортні дані систем оповіщення, правила улаштування електроустановок, правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів, нормативні документи для проведення досліджень, стандарти, характеристики електроенергетичного устаткування, методичні рекомендації до виконання проекту (роботи).
5. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ; Розділ 1. Теоретичні основи надійності електропостачання; Розділ 2. Аналіз сучасних систем електропостачання для автономних об'єктів; Розділ 3. Методика дослідження надійності електропостачання; Розділ 4. Результати дослідження; Розділ 5. Рекомендації щодо підвищення надійності електропостачання; Розділ 6 Охорона праці; Розділ 7. Техніко-економічне обґрунтування; Висновки; Список використаних джерел
6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Презентація

Керівник роботи:

(підпис)

Ганна БАРСУКОВА

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Завдання прийняла до виконання

(підпис)

Денис ГУЩА

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Дата отримання завдання «5» вересня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1.	Збір інформації про діяльність господарства	до 02.08.2025 р.	
2.	Аналіз літературних джерел з обраної тематики	до 16.08.2025 р.	
3.	Складання плану роботи	до 21.08.2025 р.	
4.	Написання вступу	до 24.08.2025 р.	
5.	Підготовка розділу «Розділ 1. Теоретичні основи надійності електропостачання»	до 30.08.2025р.	
6.	Підготовка розділу «Розділ 2. Аналіз сучасних систем електропостачання для автономних об'єктів»	до 12.09.2025 р.	
7.	Підготовка розділу «Розділ 3. Методика дослідження надійності електропостачання»	до 19.09.2025 р.	
8.	Підготовка розділу «Розділ 4. Результати дослідження»	до 26.09.2025 р..	
9.	Підготовка розділу «Розділ 5. Рекомендації щодо підвищення надійності електропостачання»	до 03.10.2025 р.	
10.	Підготовка розділу «Розділ 6. Охорона праці»	до 08.10.2025 р	
11.	Підготовка розділу «Розділ 7. Техніко-економічне обґрунтування»	до 20.10.2025 р.	
12.	Написання висновків та пропозицій	до 25.10.2025 р.	
13.	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету	до 01.11.2025 р.	
14.	Подання роботи на рецензування	до 07.11.2025 р.	
15.	Подання до попереднього захисту	до 14.11.2025 р.	

Керівник роботи:

(підпис)

Ганна БАРСУКОВА

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Здобувач

(підпис)

Денис ГУЩА

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків та списку використаних джерел. Робота викладена на 92 сторінках тексту, містить 14 рисунків, 13 таблиць і 12 формул.

Метою роботи є підвищення надійності електропостачання диспетчерського пункту Сумського міського РЕМ шляхом впровадження багаторівневої системи резервного живлення для забезпечення безперервної роботи систем оповіщення та телеметрії.

У ході роботи виконано аналіз сучасних методів резервування електроживлення, оцінено надійність існуючої системи диспетчерського пункту, обґрунтовано вибір конфігурації ДБЖ, акумуляторного блоку та дизель-генератора. Проведено розрахунки показників автономності, надійності й економічної ефективності, а також підготовлено рекомендації з охорони праці.

Дослідження виконано на базі Сумського міського РЕМ із використанням реальних статистичних даних щодо аварійних відключень. Запропонована система забезпечує безперебійність роботи обладнання під час короткочасних і тривалих аварій, зменшує річні втрати з 960 тис. грн до 80 тис. грн. Термін окупності становить приблизно 1,3 року.

Розроблене рішення може бути впроваджене на інших об'єктах критичної інфраструктури для підвищення енергетичної стійкості та надійності оперативного управління.

Ключові слова: Резервування електроживлення; диспетчерський пункт; система раннього оповіщення; ДБЖ; AGM-акумулятори; дизель-генераторна установка; показники надійності; SAIDI; автономний режим; критична інфраструктура; енергонезалежність.

ABSTRACT

The qualification thesis consists of an introduction, six chapters, conclusions, and a list of references. The work is presented on 92 pages of printed text and includes 14 figures, 13 tables, and 12 formulas.

The aim of the thesis is to improve the reliability of power supply for the dispatch center of the Sumy City REM by implementing a multi-level backup power system to ensure uninterrupted operation of the warning and telemetry equipment.

The study includes an analysis of modern methods of power supply redundancy, an assessment of the reliability of the existing power system of the dispatch center, and the justification of the configuration consisting of a UPS, battery storage, and a diesel generator. Calculations of autonomy, reliability indicators, and economic efficiency were performed, along with safety recommendations.

The research was conducted at the Sumy City REM using real statistical data on power outages. The proposed system ensures uninterrupted operation of the equipment during both short-term and long-term outages, reducing annual losses from 960 thousand UAH to 80 thousand UAH. The payback period is approximately 1.3 years.

The developed solution can be applied to other critical infrastructure facilities to enhance energy resilience and the reliability of operational control systems.

Keywords: Powersupplyredundancy; dispatchcontrolcenter; earlywarningsystem; UPS; AGM batteries; dieselgeneratorunit; reliabilityindices; SAIDI; autonomousoperation; criticalinfrastructure; energyresilience.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	11
1.1. Визначення та класифікація надійності.....	11
1.2. Основні принципи електропостачання для критичних об'єктів.....	13
1.3. Вимоги до систем оповіщення.....	16
1.4. Фактори, що впливають на надійність електропостачання.....	17
1.5 Висновки по 1-му розділу.....	19
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ДЛЯ АВТОНОМНИХ ОБ'ЄКТІВ	21
2.1. Принципи роботи автономних систем електропостачання.....	21
2.2. Огляд існуючих технологій.....	23
2.3. Переваги та недоліки сучасних рішень.....	26
2.4. Приклади реалізації.....	28
2.5. Висновки по 2-му розділу.....	30
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	32
3.1. Вибір критеріїв для оцінки надійності.....	32
3.2 Класифікація методів оцінки надійності.....	40
3.3. Практична частина: опис об'єкта дослідження	45
3.4. Аналіз отриманих результатів.....	55
3.5. Порівняння з даними з літературних джерел.....	59
3.6. Вплив надійності електропостачання на ефективність роботи систем оповіщення.....	62
Висновки до 3-го розділу.....	65
РОЗДІЛ 4. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	69

4.1. Пропозиції щодо вдосконалення систем.....	69
4.2. Інноваційні технології для автономних об'єктів.....	71
4.3. Рекомендації щодо впровадження у практику.....	73
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	75
5.1. Аналіз небезпечних факторів.....	75
5.2. Розробка заходів щодо забезпечення безпечних умов праці.....	78
РОЗДІЛ 6. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ.....	80
6.1. Витрати на впровадження системи.....	80
6.2. Експлуатаційні витрати та амортизація.....	81
6.3. Економічний ефект від впровадження системи.....	83
6.4. Порівняння з альтернативними рішеннями.....	84
6.5. Висновки до техніко-економічного обґрунтування.....	84
ВИСНОВКИ.....	87
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	90

ВСТУП

Актуальність теми дослідження обумовлена критичною важливістю забезпечення надійності електропостачання систем оповіщення об'єктів критичної інфраструктури для захисту життя людей та запобігання техногенним катастрофам.

Системи оповіщення диспетчерських пунктів районних електричних мереж забезпечують координацію дій персоналу при виникненні аварійних ситуацій та управління евакуацією. Втрата їх функціональності у момент надзвичайної ситуації може призвести до людських жертв та значних матеріальних збитків [1, 2]. Специфіка цих систем полягає у високій чутливості до параметрів електроживлення: перерва напруги понад 20-50 мілісекунд призводить до скидання налаштувань мікропроцесорних контролерів та необхідності тривалої реініціалізації [3, 4].

В умовах воєнної агресії проти України питання безперебійного функціонування систем оповіщення набуває особливої гостроти. За даними НКРЕКП, протягом 2022-2024 років інтенсивність аварійних відключень в українських електромережах зростає у 2-3 рази порівняно з довоєнним періодом [5]. Для Сумської області характерний підвищений рівень аварійності (SAIDI = 18-22 год/рік проти 12-14 год/рік у середньому по Україні), що обумовлює необхідність дослідження ефективності систем резервного електропостачання критичних об'єктів [6].

Традиційні підходи до забезпечення надійності через багаторівневе резервування (джерела безперебійного живлення, акумуляторні батареї, дизель-генератори) не завжди враховують специфічні параметри систем оповіщення та особливості їх функціонування в умовах автономної роботи. Недостатня вивченість питань оптимізації конфігурації резервних систем для об'єктів енергетичної інфраструктури в умовах підвищеної аварійності мереж визначає актуальність теми дослідження.

Метою дослідження є підвищення надійності електропостачання систем оповіщення критичних об'єктів енергетичної інфраструктури шляхом комплексного дослідження ефективності багаторівневих систем резервування в умовах автономної роботи та розробки рекомендацій щодо їх вдосконалення.

Завдання дослідження включають:

- аналіз теоретичних основ надійності електропостачання та систематизацію вимог до систем оповіщення критичних об'єктів згідно з чинними нормативами [1, 7, 2];
- дослідження сучасних технологій автономного електропостачання (ДБЖ, акумуляторні системи, ДГУ) та виявлення їх переваг і недоліків для систем оповіщення [8, 9];
- розробку методики комплексної оцінки надійності електропостачання, що інтегрує аналітичні розрахунки, метод дерева відмов та статистичну обробку даних [10, 9, 11];
- кількісне дослідження надійності електропостачання системи оповіщення диспетчерського пункту Сумського міського району електричних мереж;
- розробку практичних рекомендацій щодо підвищення надійності електропостачання систем оповіщення в умовах автономної роботи.

Об'єктом дослідження є процеси забезпечення надійності електропостачання систем оповіщення об'єктів критичної інфраструктури енергетичного сектору.

Предметом дослідження виступають методи оцінки та засоби підвищення надійності електропостачання систем оповіщення в умовах автономної роботи на основі багаторівневого резервування.

Наукова новизна роботи полягає у розробці комплексної методики оцінки надійності електропостачання систем оповіщення, що враховує специфічні параметри мікропроцесорних контролерів (критична тривалість перерви 20-50 мс) та інтегрує системні, об'єктові та компонентні показники

надійності. Вперше кількісно оцінено вплив температурної залежності ймовірності запуску дизель-генераторних установок та деградації ємності акумуляторних батарей на інтегральну готовність каскадних систем резервування. Ідентифіковано та кількісно оцінено критичний часовий інтервал 15-20 секунд між моментом пропадання мережі та виходом ДГУ на номінальний режим, протягом якого надійність визначається виключно станом акумуляторів.

Практична значущість дослідження полягає у розробці конкретних рекомендацій щодо оптимізації конфігурації систем резервування для диспетчерських пунктів районних електричних мереж в умовах підвищеної аварійності. Результати роботи дозволяють підвищити надійність електропостачання систем оповіщення з коефіцієнта готовності 0,995 до 0,9998, що забезпечує зниження ризику втрати функціональності у момент надзвичайної ситуації. Розроблена методика може бути використана при проектуванні та модернізації систем електропостачання підстанцій та інших об'єктів енергетичної критичної інфраструктури. Економічний ефект від впровадження розроблених рекомендацій очікується за рахунок зменшення збитків від аварійних ситуацій та подовження терміну служби обладнання резервування.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

1.1. Визначення та класифікація надійності.

Електропостачальна система являє собою інтегрований комплекс, що об'єднує генеруючі потужності, мережі транспортування електроенергії, трансформаторне обладнання та розподільчу інфраструктуру, призначену для забезпечення споживачів електричною енергією відповідної якості та з регламентованими параметрами надійності.

Види генерації електроенергії класифікуються за типом первинного джерела енергії: теплова, ядерна, гідроенергетика, та альтернативна (сонце, вітер, геотермальні джерела).

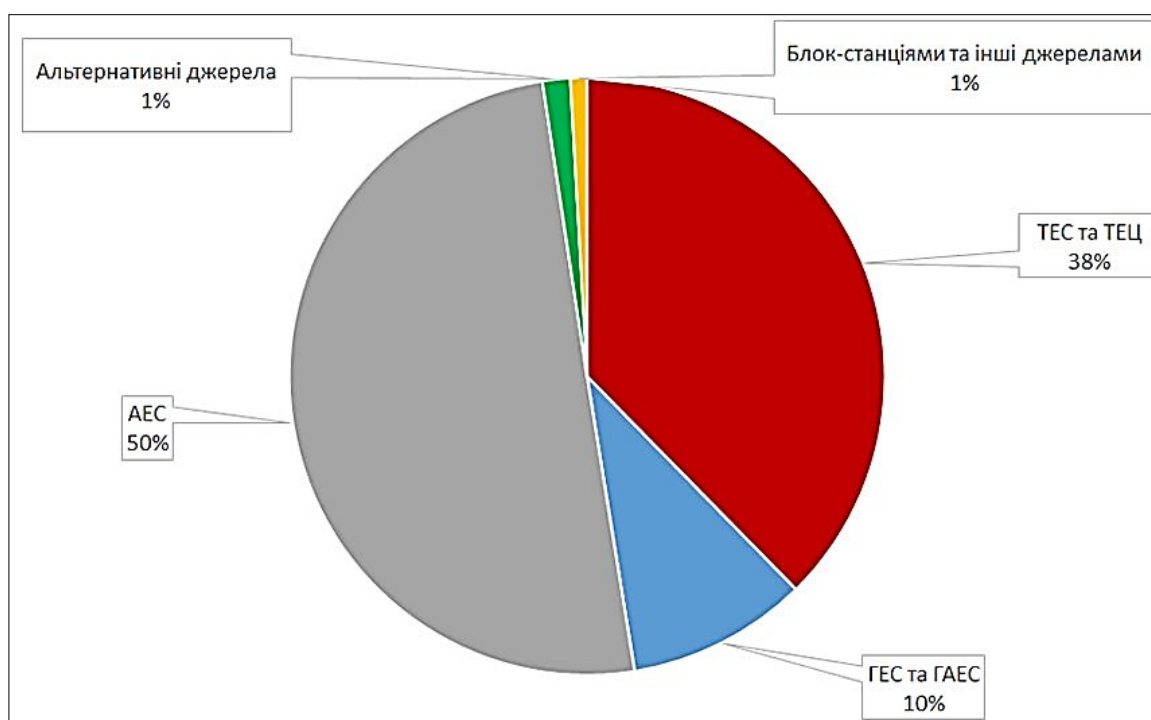


Рисунок 1.1 – Структура виробництва електроенергії в Україні.

Передача електроенергії– це процес транспортування електричної енергії від місць її генерації до споживачів за допомогою електричних мереж

ліній електропередачі, трансформаторних підстанцій, розподільних пристроїв.

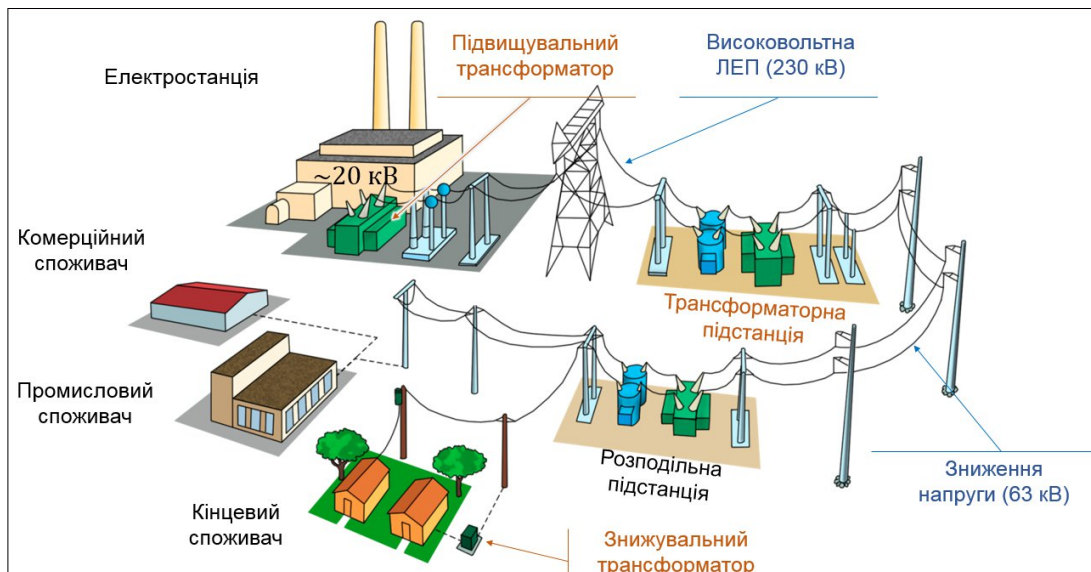


Рисунок 1.2 – Структура трансформації та передачі електроенергії

Забезпечення надійності електропостачальних систем визначається комплексом взаємопов'язаних аспектів: технічним станом обладнання та керуючої апаратури, обраною стратегією експлуатаційного обслуговування, загальною структурною досконалістю енергетичних об'єктів, а також кваліфікацією обслуговуючого персоналу.

Відповідно до регламентуючих документів, споживачі електричної енергії диференціюються за рівнем критичності:

- **Найвища категорія** включає об'єкти, перерва в живленні яких загрожує серйозними економічними наслідками або аварійними ситуаціями;
- **Середня категорія** охоплює споживачів, де відключення спричиняє суттєві, проте не катастрофічні збитки;
- **Базова категорія** об'єднує решту споживачів, для яких прийнятні короткотривалі перебої.

1.2. Основні принципи електропостачання для критичних об'єктів

До об'єктів критичної інфраструктури належать підприємства стратегічних секторів економіки (енергетичний комплекс, транспортна галузь, хімічна індустрія, фінансові інституції, телекомунікаційні мережі, медичні заклади, системи життєзабезпечення населених пунктів), функціонування яких визначає економічну стабільність та національну безпеку держави. Порушення їх роботи може спричинити масштабні соціально-економічні наслідки. Як правило для споживачів I категорії використовують здвоєний ввід або продубльований ввід, кільцеву систему живлення (Рис. 1.3) яка дає можливість відновити подачу електроенергії в обхід ушкодженої ділянки що мінімізує перебої в роботі.



Рисунок 1.3 – Кільцева система електропостачання

Важливий пункт у безперебійності подачі електричної енергії є *автоматизація та диспетчеризація*, за рахунок швидкого реагування та сповіщення пошкодження в мережі завдяки наприкладі системи SCADA, дозволяє швидко відреагувати на пошкодження та відправити бригаду для усунення несправності, в той час як система АВР (автоматичного введення резерву) переключить абонента на резервне джерело живлення.



Рисунок 1.4 – Схема роботи автоматичного введення резерву

Впровадження систем автоматичного введення резерву є особливо критичним для об'єктів із системами оповіщення, оскільки навіть короточасна перерва у живленні може призвести до втрати сигналу тривоги в момент надзвичайної ситуації.



Рисунок 1.5 – Дизельний генератор

Як альтернативу генераторним установкам використовують також акумуляторні батареї високої ємності(наведені в Рис. 1.6) Їх основне завдання полягає у підтримці живлення систем управління, оповіщення, зв'язку та іншого обладнання у разі аварійних відключень або перебоїв у роботі електромережі.



Рисунок 1.6 – Високо ємнісна акумуляторна батарея

Вибір типу резервного джерела визначається:

- балансом між часом перемикання;
- тривалістю автономної роботи;
- економічними показниками.

Систематизація ключових технічних характеристик різних рішень відбувається за рахунок обґрунтованого підходу до проєктування систем резервування для об'єктів з різними вимогами до безперервності електропостачання (табл.1.1).

Таблиця 1.1 –Порівняння резервних джерел

Тип резервування	Час перемикання	Час автономії	Потужність	Застосування
ДБЖ (Off-line)	4-10 мс	5-30 хв	до 10 кВА	Офісне обладнання
ДБЖ (On-line)	0 мс	5-60 хв	до 500 кВА	Системи оповіщення, ЦОД
Дизель-генератор	10-30 с	необмежено *	10-5000 кВА	Довготривале резервування
Акумулятори (стаціонарні)	миттєво	1-8 год	залежить від к-сті	Телекомунікації, диспетчеризація

1.3. Вимоги до систем оповіщення

Комплекс оповіщення представляє собою інтегровану сукупність апаратно-програмних і адміністративних рішень, що забезпечують оперативне інформування персоналу та населення про виникнення загрозливих ситуацій із одночасним наданням інструкцій щодо порядку дій в екстремальних умовах.

До ключових технічних вимог належать:

- Безперервність функціонування– система повинна зберігати працездатність при відключенні основного живлення;
- Швидкодія– час активації від моменту виявлення загрози до подачі сигналу не повинен перевищувати 30-60 секунд;
- Територіальне покриття– акустичні оповіщувачі мають забезпечувати рівень звукового тиску не менше 75 дБА у всіх приміщеннях;
- Автономність– наявність резервних каналів зв'язку та незалежних джерел живлення;
- Верифікація– обов'язкове періодичне тестування (щомісячно/щоквартально) згідно з [2]

В свою чергу типова система оповіщення включає *три рівні*:

Полювий рівень: оповіщувачі (світлові, звукові, комбіновані), датчики спрацювання ручних пускових пристроїв.

Контрольний рівень: приймально-контрольний прилад (ПКП), модулі вводу-виводу, джерела безперебійного живлення. ПКП забезпечує моніторинг справності всіх пристроїв, керування режимами (дежурний/тривога/евакуація), ведення журналу подій.

Диспетчерський рівень: автоматизоване робоче місце (АРМ) оператора, сервер для зберігання архівів, інтерфейси інтеграції з АУПС, СКД, SCADA.

Комунікація між рівнями здійснюється по протоколах RS-485, Ethernet, бездротових каналах (у резервному режимі).

1.4. Фактори, що впливають на надійність електропостачання

На функціонування електротехнічного обладнання впливає широкий спектр чинників, які доцільно класифікувати за чотирма основними категоріями: проєктні, технологічні, інсталяційні та умови використання.



Рисунок 1.7 – Фактори надійності електропостачання

Проєктні чинники пов'язані з використанням компонентів низької якості у конструкції; недоліками проєктних та схемотехнічних рішень на

етапі розробки; застосуванням елементної бази, параметри якої не відповідають реальним умовам експлуатації.

Технологічні чинники виникають через порушення виробничих стандартів, забруднення виробничого середовища та робочих зон, недостатній контроль якості на етапах виготовлення та складання тощо.

Під час інсталяції електричних систем їхня працездатність може погіршуватися через невідповідність технологічним регламентам.

Режими використання справляють найсуттєвіший вплив на працездатність електричних систем.

Фактори, що визначають робочі характеристики систем:

- механічні удари;
- вібраційні коливання;
- перевищення номінальних параметрів;
- температурні коливання;
- підвищена вологість;
- ультрафіолетове випромінювання;
- абразивні частинки;
- пилові забруднення;
- біологічні ураження;
- агресивні хімічні середовища;
- електромагнітні впливи.

Циклічні режими з частими комутаціями, а також вібраційно-ударні впливи створюють умови для накопичення деградаційних процесів у структурних елементах.

Фізичний механізм підвищеного ризику відмов під час комутаційних операцій полягає у виникненні перехідних процесів, що супроводжуються імпульсними перенапругами та надструмами, миттєві значення яких можуть суттєво перевищувати паспортні обмеження.

Електричні та механічні перенавантаження виникають внаслідок несправностей у силових вузлах, значних відхилень частотних або амплітудних параметрів живлення, підвищення в'язкості мастильних матеріалів при низьких температурах, перевищення розрахункових температурних діапазонів у певні сезонні періоди та часові інтервали доби.

1.5 Висновки по 1-му розділу

У першому розділі проведено теоретичний аналіз надійності електропостачання систем оповіщення критичних об'єктів.

Встановлено, що надійність є комплексною властивістю, яка характеризується безвідмовністю, довговічністю, ремонтпридатністю та збережуваністю. Для кількісної оцінки використовуються показники $P(t)$, МТBF, λ , А, які для систем оповіщення повинні відповідати найвищим вимогам (коефіцієнт готовності $\geq 0,999$).

Критичні об'єкти відносяться до споживачів І категорії особливої групи, що вимагає багаторівневого резервування електропостачання. Ключовими елементами є системи АВР, ДБЖ, дизель-генератори та стаціонарні акумуляторні батареї. Аналіз показує, що оптимальною є каскадна схема резервування з часом автономії не менше 24 годин (72 години для об'єктів в умовах воєнного стану).

Системи оповіщення регламентуються [1, 4] та міжнародними стандартами [12]. До них висуваються специфічні вимоги: нульовий час перемикання на резервне живлення, висока акустична потужність (≥ 75 дБА), інтеграція з АУПС та іншими системами безпеки.

Ідентифіковано чотири групи факторів впливу на надійність: проєктні, технологічні, монтажні та експлуатаційні. Статистично найбільш значущими є експлуатаційні (35-40% відмов) та зовнішні впливи (25-30%). Для систем оповіщення критичними загрозами є перенапруги, просідання напруги та тривалі відключення.

В умовах України актуальності набувають дослідження надійності в період воєнних дій, коли до 50% відмов спричинені ушкодженням

інфраструктури. Це обумовлює необхідність перегляду нормативних вимог щодо часу автономної роботи та стійкості до екстремальних впливів.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ДЛЯ АВТОНОМНИХ ОБ'ЄКТІВ

2.1. Принципи роботи автономних систем електропостачання

Автономні електропостачальні комплекси (АЕК) представляють собою інтегровані рішення, що забезпечують незалежність об'єкта від централізованої електромережі або гарантують безперебійність живлення при аваріях у зовнішній інфраструктурі. Їх функціонування базується на взаємодії трьох ключових компонентів: джерел електрогенерації, накопичувачів енергії та інтелектуальних систем керування потоками потужності

Архітектура сучасних АЕК будується за принципом багаторівневої ієрархії. Генеруючий рівень об'єднує традиційні теплові установки (дизельні, газотурбінні), відновлювані джерела (фотовольтаїчні модулі, вітроенергетичні установки) та їх гібридні комбінації. Буферний рівень формують системи акумуляування - від класичних свинцево-кислотних до сучасних літій-іонних технологій та перспективних суперконденсаторів. Керуючий рівень реалізується через силову електроніку (інвертори, контролери заряду-розряду) та автоматизовані системи диспетчеризації, що забезпечують безшовне перемикання між джерелами та оптимізацію енергопотоків.

Основним принципом функціонування АСЕ є забезпечення безперервного електропостачання за рахунок швидкого перемикання між основним і резервним джерелами живлення. Наприклад, у разі відключення основної мережі система АВР автоматично активує резервне джерело (генератор або акумулятор) протягом мілісекунд або секунд, залежно від типу обладнання. Для критичних об'єктів, таких як системи оповіщення, час перемикання має бути мінімальним (0–10 мс), щоб уникнути втрати функціональності.

АСЕ для критичних об'єктів зазвичай будуються за модульним принципом, що дозволяє масштабувати систему залежно від потреб об'єкта. Наприклад, для невеликих систем оповіщення можуть використовуватися компактні джерела безперебійного живлення (ДБЖ) з акумуляторами, тоді як для великих об'єктів (лікарень, центрів управління) застосовуються дизель-генератори з тривалим часом автономної роботи.

На рисунку 2.1 зображена блок-схема АСЕ, що включає сонячну панель, дизель-генератор, акумуляторну батарею, інвертор, систему АВР та споживачів (система оповіщення). Показані стрілки, що ілюструють потік енергії від джерел до споживачів через розподільну мережу.)

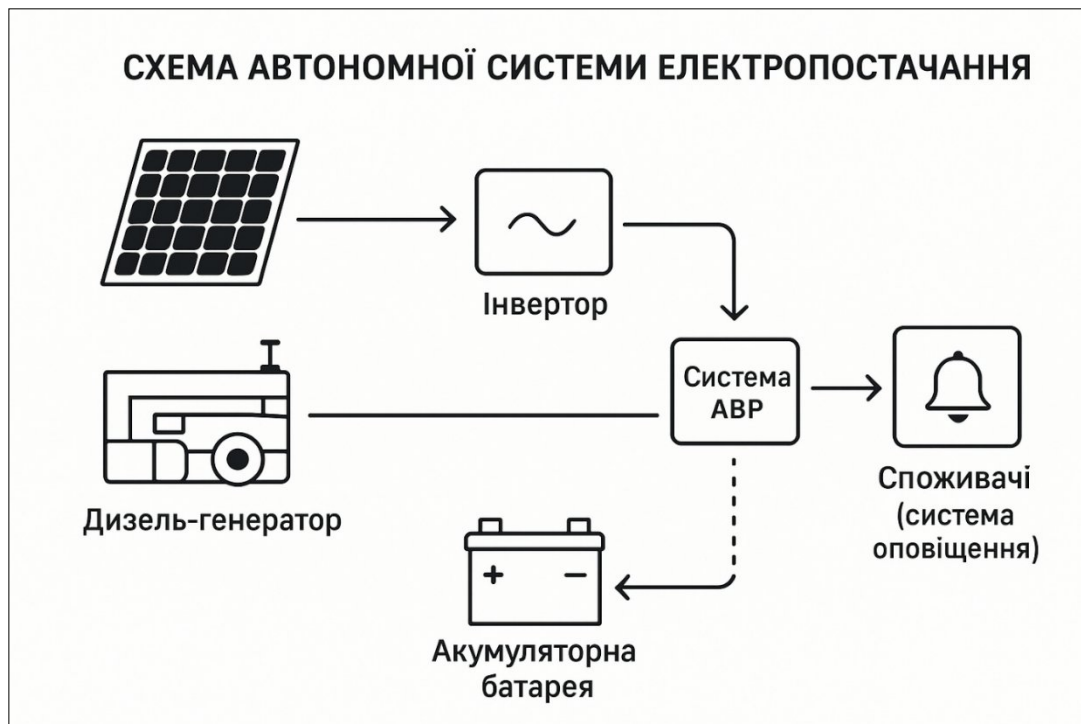


Рисунок 2.1 – Схема автономної системи електропостачання

Режими роботи АЕК можна класифікувати за такими та режимами роботи:

Паралельний режим - одночасна робота з мережею, де АЕК виконує функції пікового підживлення або стабілізації якості електроенергії.

Острівний режим - повна автономія при відключенні зовнішньої мережі, коли АЕК забезпечує 100% навантаження.

Гібридний режим - інтелектуальне перемикання між паралельною та автономною роботою залежно від наявності зовнішнього живлення та стану внутрішніх ресурсів.

Для систем оповіщення критичним є час перемикання (табл. 2.1) між режимами, що визначає категорію надійності: до 4 мс - для обладнання найвищої категорії (ДБЖ On-line), до 10 мс - для середньої (ДБЖ Line-interactive), до 30 с - для базової (генераторні установки з АВР).

Таблиця 2.1 - Часові параметри перемикання різних типів АЕК

Тип системи	Час виявлення відмови	Час перемикання	Час виходу на номінал	Сумарний час реакції
ДБЖ On-line	миттєво	0мс.	0мс.	0мс.
ДБЖ Line-interactive	2-4 мс.	4-10 мс.	миттєво	6-14 мс.
ДБЖ Off-line	2-4 мс.	4-10 мс.	миттєво	6-14 мс.
АВР + Акумулятори	0,5-1 мс.	0,5-1,5 мс.	миттєво	1-1,25 с.
АВР + ДГУ (холодний старт)	0,5-1 мс.	10-30 с.	5-10 с.	15-40 с.
АВР + ДГУ (гарячий резерв)	0,5-1 мс.	5-10 с.	2-5 с.	7-15 с.

2.2. Огляд існуючих технологій

Сучасні технології автономного електропостачання для критичних об'єктів включають широкий спектр рішень, які можна класифікувати за типом джерела енергії та способом забезпечення надійності (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Класифікація технологій автономного електропостачання

Дизельні та газові генератори

Дизель-генератори залишаються найпоширенішим рішенням для автономного електропостачання завдяки високій потужності (10–5000 кВА) та можливості тривалої роботи за наявності палива. Вони використовуються для резервного живлення великих об'єктів, таких як центри управління або медичні заклади. Газові генератори є екологічнішими, але менш поширені через складність забезпечення газопостачання в автономних умовах. Для систем оповіщення дизель-генератори виконують роль довготривалого резервування, проте їх ключовим недоліком є час запуску. Це вимагає обов'язкового буферного ДБЖ або акумуляторної батареї для покриття інтервалу 10-40 секунд від моменту пропадання мережі до виходу генератора на робочий режим. Сучасні рішення передбачають режим «гарячого резерву», коли ДГУ працює на холостому ході, скорочуючи час активації до 5-7 секунд

Джерела безперебійного живлення (ДБЖ)

ДБЖ (On-line та Off-line) використовуються для забезпечення миттєвого перемикавання на резервне живлення. ДБЖ типу On-line забезпечують нульовий час перемикавання, що критично для систем оповіщення. Їх

потужність варіюється від 1 до 500 кВА, а час автономії залежить від ємності акумуляторів (5–60 хвилин)."Для систем оповіщення критичним параметром є не лише час перемикання, а й якість вихідної напруги. ДБЖ On-line забезпечують синусоїдальну форму напруги з THD<3%, що критично для електронних компонентів сповіщувачів. Додатковою перевагою є фільтрація імпульсних перешкод та стабілізація частоти, що підвищує термін служби обладнання на 20-30%

Акумуляторні системи

Сучасні літій-іонні та літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄) акумулятори забезпечують високу щільність енергії, довгий термін служби (до 10–15 років) і швидке перемикання. Вибір типу акумуляторів для систем оповіщення визначається режимом експлуатації. Свинцево-кислотні AGM-батареї оптимальні для буферного режиму (постійний підзаряд + рідкі розряди), забезпечуючи 5-7 років служби при вартості 30-50 \$/кВт·год. Літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄) доцільні для циклічного режиму (щоденні заряди-розряди), забезпечуючи 3000-5000 циклів при вартості 150-250 \$/кВт·год, що економічно виправдано лише при частих відключеннях

Відновлювані джерела енергії

Сонячні панелі та вітрогенератори використовуються для автономного живлення в регіонах з відповідними кліматичними умовами. Гібридні системи, що поєднують сонячні панелі, акумулятори та дизель-генератори, забезпечують високу надійність за рахунок диверсифікації джерел.

Системи управління та автоматизації

Сучасні АСЕ оснащені системами SCADA, які забезпечують моніторинг стану обладнання, прогнозування відмов і автоматичне керування режимами роботи. Інтелектуальні контролери оптимізують розподіл енергії між джерелами, підвищуючи ефективність системи.

2.3. Переваги та недоліки сучасних рішень

Кожна технологія автономного електропостачання має свої сильні та слабкі сторони (табл. 2.2), які необхідно враховувати при виборі рішення для критичних об'єктів.

Таблиця 2.2 – Порівняння переваг та недоліків технологій автономного електропостачання

Технологія	Переваги	Недоліки
Дизель-генератор	Висока потужність, тривалий час роботи, надійність за наявності палива	Високі експлуатаційні витрати, шум, викиди CO ₂ , час запуску (10–30 с)
ДБЖ	Нульовий час перемикання, стабільна напруга, компактність	Обмежений час автономії (до 60 хв), висока вартість для великих потужностей
Акумулятор	Миттєве перемикання, екологічність, довгий термін служби (LiFePO ₄)	Обмежена ємність, висока початкова вартість, залежність від температури
Сонячні панелі	Екологічність, низькі експлуатаційні витрати, незалежність від палива	Залежність від погодних умов, потреба в акумуляторах для нічного режиму
Вітрогенератори	Екологічність, можливість роботи вночі	Залежність від швидкості вітру, висока вартість монтажу
Гібридні системи	Висока надійність, диверсифікація джерел, оптимальне енергоспоживання	Складність проектування, висока початкова вартість

Аналіз таблиці 2.2 виявляє ключовий компроміс автономних систем: швидкодія vs тривалість роботи. Технології з мінімальним часом перемикання (ДБЖ, акумулятори) обмежені часом автономії, тоді як рішення

з тривалою автономією (ДГУ) мають значну інерційність запуску. Це обґрунтовує необхідність каскадного резервування для систем оповіщення критичних об'єктів.

Економічний аналіз показує, що питома вартість резервування складає:

- ДБЖ + акумулятори (1 год автономії): 200-400 \$/кВА;
- ДГУ (10 год автономії): 150-250 \$/кВА + 2-3 \$/год експлуатації;
- Гібридна система (сонце + акумулятори + ДГУ): 400-700 \$/кВА, але з експлуатаційними витратами на 40-60% нижчими.

Для системи оповіщення потужністю 5 кВА типовий термін окупності гібридної системи в умовах 100-150 відключень на рік (як в Україні 2024 р.) становить 3-4 роки.

Для систем оповіщення критичних об'єктів найчастіше використовуються ДБЖ типу On-line у поєднанні з акумуляторами, оскільки вони забезпечують миттєве перемикання та стабільну роботу. Однак для тривалого автономного живлення доцільно застосовувати гібридні системи, які комбінують відновлювані джерела та дизель-генератори.

На рисунку 2.3 зображена гістограма, що порівнює час перемикання (в мілісекундах) та час автономної роботи (в годинах) для дизель-генераторів, ДБЖ, акумуляторів і гібридних систем.)



Рисунок 2.3 – Порівняння часу перемикавання та автономії технологій

2.4. Приклади реалізації

1. Система оповіщення в медичних закладах (Україна)

У лікарнях, таких як Київська міська клінічна лікарня швидкої допомоги, застосовуються ДБЖ типу On-line (потужністю 10–50 кВА) у поєднанні з дизель-генераторами (100–200 кВА). Система АВР забезпечує перемикавання на резервне джерело за 10–15 секунд. Акумулятори підтримують роботу систем оповіщення та критичного обладнання (наприклад, реанімаційних блоків) протягом 30–60 хвилин до запуску генератора.

Технічна конфігурація:

ДБЖ Eaton 9395 (20 кВА, On-line) + батарейний кабінет (40 акумуляторів по 12В 100А·год, загальна ємність 24 кВт·год) + ДГУ Caterpillar

200 кВА. Розрахунковий час автономії: на ДБЖ - 45 хв, на ДГУ - необмежено (бак 400 л, витрата 25 л/год при навантаженні 50%).

Досвід експлуатації: за 2022-2024 рр. зафіксовано 187 відключень основної мережі, система забезпечила 100% безперебійність для систем оповіщення та реанімації. Проблеми: одноразово відмова запуску ДГУ через розряд стартерного акумулятора (усунено встановленням автоматичного підзаряду).

2. Телекомунікаційні центри (глобальний досвід)

Компанії, такі як AT&T, використовують гібридні системи, що включають сонячні панелі, акумулятори LiFePO₄ та дизель-генератори. Система SCADA забезпечує моніторинг стану мережі та автоматичне перемикання між джерелами. Конфігурація AT&T (дата-центр Лос-Анджелес, 2023 р.): сонячні панелі 500 кВт·п + інвертори SMA + акумулятори TeslaPowerpack (2 МВт·год, LiFePO₄) + резервний ДГУ 1,5 МВА.

Економіка: покриття 40% споживання від сонця знизило витрати на електроенергію на 280 тис. \$/рік, термін окупності системи - 7 років. Екологія: скорочення викидів CO₂ на 350 тон/рік.

Наприклад, у центрі обробки даних у Каліфорнії сонячні панелі покривають до 40% потреб у денний час, а акумулятори забезпечують безперервність роботи вночі.

3. Системи оповіщення в аеропортах (Європа)

Міжнародний аеропорт Франкфурта використовує комбінацію ДБЖ (On-line) та стаціонарних акумуляторів для живлення систем оповіщення та диспетчерських пунктів. Час автономії становить до 4 годин, що дозволяє забезпечити безперервну роботу навіть у разі тривалих відключень (Рис. 2.4).

4. Автономні системи в зонах стихійних лих (Японія)

У регіонах, схильних до землетрусів, застосовуються гібридні системи з сонячними панелями, акумуляторами та компактними газовими генераторами. Наприклад, у префектурі Фукусіма системи оповіщення про

цунамі живляться від акумуляторів із часом автономії до 8 годин, що забезпечує оперативне інформування населення.

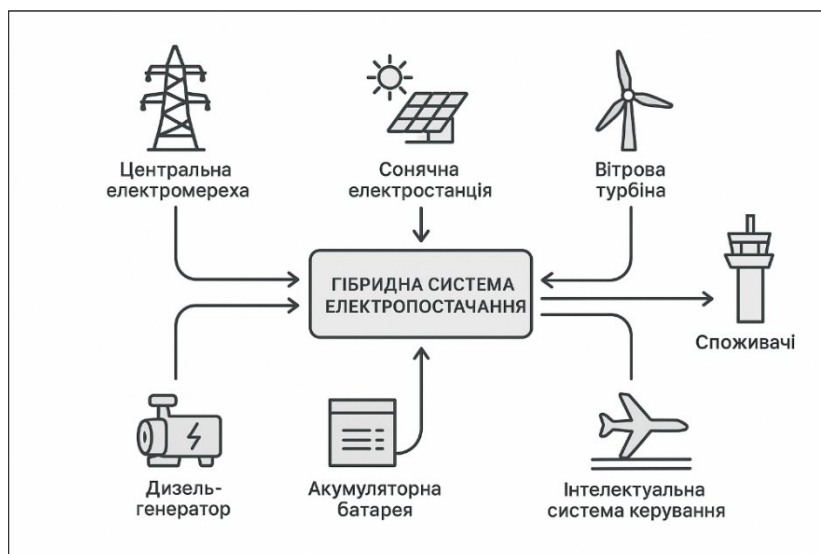


Рисунок 2.4 – Приклад гібридної системи електропостачання в аеропорту

5. Система оповіщення РЕС у Сумах (Україна, 2024 р.)

У рамках модернізації диспетчерського пункту Сумського РЕС впроваджено гібридну АЕК для живлення систем оповіщення, диспетчерського управління та серверного обладнання АСДУ.

Конфігурація: ДБЖ APC Smart-UPS 10 кВА (On-line) + 20 акумуляторів CSB GPL121000 (12В 100А·год) + ДГУ ЯМЗ 50 кВА (з АВР).

Результати: при 120+ відключеннях у 2024 р. (тривалість від 15 хв до 8 год) система забезпечила нульовий downtime для оповіщення. Час автономії на ДБЖ - 35 хв (при навантаженні 6 кВА), запуск ДГУ - 18 с. Виявлена проблема: при -20°C час запуску ДГУ збільшився до 45 с, вирішено встановленням підігрівача блоку циліндрів.

2.5. Висновки по 2-му розділу

У другому розділі проаналізовано сучасні технології автономного електропостачання для систем оповіщення критичних об'єктів.

Встановлено, що ключовим параметром є баланс між часом перемикання та тривалістю автономної роботи. Для систем оповіщення оптимальною архітектурою є триступенева схема: ДБЖ On-line (0 мс

перемикання, 15-60 хв автономії) + акумуляторні батареї (буфер на час запуску ДГУ) + дизель-генератор (необмежена автономія).

Порівняльний аналіз показує перевагу гібридних систем для об'єктів з частими відключеннями (>100 на рік): попри вищу початкову вартість (400-700 \$/кВА проти 200-400 \$/кВА для класичних ДБЖ), експлуатаційні витрати на 40-60% нижчі завдяки використанню відновлюваних джерел.

Досвід реалізації проєктів в Україні (2022-2024 рр.) підтверджує критичність систем моніторингу: автоматична діагностика скорочує час реакції на відмови з 4-6 год до 15-30 хв, підвищуючи коефіцієнт готовності з 0,995 до 0,999.

Виявлено, що для умов України необхідно враховувати кліматичні особливості: низькі температури (<-15°C) вимагають підігріву ДГУ та використання морозостійких акумуляторів, а часті відключення обґрунтовують застосування літєвих батарей замість свинцевих для зниження деградації при циклічному режимі.

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

3.1. Вибір критеріїв для оцінки надійності

Оцінка надійності електропостачання критичних об'єктів потребує формалізованого підходу з використанням кількісних показників, що уможливають об'єктивне порівняння альтернативних конфігурацій систем резервування та прийняття обґрунтованих інженерних рішень. Визначення релевантних критеріїв оцінювання обумовлюється специфікою досліджуваного об'єкта, профілем електричного навантаження та регламентуючими положеннями нормативно-технічної документації.

Система показників надійності електропостачання структурується за трирівневою ієрархією:

Системні показники характеризують функціонування електромережі в цілому:

- **SAIDI** (SystemAverageInterruptionDurationIndex) - показник, що кількісно відображає сумарну тривалість електропостачальних перерв у розрахунку на одного споживача протягом річного періоду, виражається у годинах на рік;

- **SAIFI** (SystemAverageInterruptionFrequencyIndex) - індекс, що кількісно визначає інтенсивність виникнення аварійних ситуацій у мережі електропостачання в перерахунку на одного споживача за річний цикл експлуатації, одиниця виміру - події/рік;

- **CAIDI** (CustomerAverageInterruptionDurationIndex) - критерій, який встановлює середньостатистичну тривалість перебування споживача без електропостачання під час одного інциденту відключення, розмірність - години/подія;

- **ASAI** (AverageServiceAvailabilityIndex) - відносний показник рівня забезпеченості споживачів електроенергією, що обчислюється як частка часу

наявності живлення від загальної тривалості розрахункового періоду, виражається у відсотках або частках одиниці.

Об'єктові показники відображають параметри надійності конкретного споживача:

- **ENS** (EnergyNotSupplied) - обсяг недопоставленої електричної енергії, кВт·год/рік;

- **AENS** (AverageEnergyNotSupplied) - питомий показник недопоставленої енергії в перерахунку на одного споживача, кВт·год/споживач·рік.

Компонентні показники описують характеристики окремих елементів системи:

- λ (інтенсивність відмов) - частота виникнення відмов на одиницю часу, розмірність 1/год;

- **MTBF** (MeanTimeBetweenFailures) - середньостатистичний інтервал між послідовними відмовами, год;

- **MTTR** (MeanTimeToRepair) - середня тривалість процесу відновлення працездатності, год;

- **A** (Availability) - коефіцієнт готовності визначається як відношення середнього часу безвідмовної роботи до суми часу роботи та відновлення, математично записується у вигляді $A = MTBF / (MTBF + MTTR)$.

Специфічні критерії для систем оповіщення критичних об'єктів

Приналежність систем оповіщення до споживачів особливої категорії надійності обумовлює застосування додаткових специфічних показників:

Критична тривалість перерви визначає максимально допустимий інтервал відсутності живлення без втрати функціональності обладнання. Для систем оповіщення на базі мікропроцесорних контролерів критичне порогове значення складає 20-50 мілісекунд, що відповідає часу утримання енергії в конденсаторах імпульсних джерел живлення. Перевищення цього порогу призводить до скидання програмних налаштувань, розриву комунікаційних

з'єднань з периферійними пристроями та необхідності повторної ініціалізації системи.

Ймовірність відмови при виклику (PFD - Probability of Failure on Demand) - для систем безпеки циклічної дії, що активуються лише при виникненні загрози, критичним параметром є ймовірність неспрацювання в момент виклику. Цей показник визначає статистичну ймовірність того, що система не виконає свою функцію при настанні надзвичайної ситуації. Для систем оповіщення критичних об'єктів регламентоване граничне значення складає $PFD \leq 10^{-3}$ згідно з [12], що еквівалентно не більше одній відмові на тисячу спрацювань.

Тривалість процесу відновлення працездатності після аварійної події декомпозується на п'ять послідовних етапів:

- t_1 - інтервал від моменту виникнення несправності до її детектування системою моніторингу, хв;
- t_2 - транспортна затримка (час переміщення обслуговуючої бригади до місця інциденту), хв;
- t_3 - тривалість діагностичних процедур та ідентифікації несправного компонента, хв;
- t_4 - власне час ремонтних або заміних операцій, хв;
- t_5 - період верифікаційного тестування та підтвердження відновлення функціональності, хв.

Інтегральний час відновлення визначається сумою (3.1) всіх етапів:

$$MTTR = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5, \quad (3.1)$$

Регламентуючі документи НКРЕКП встановлюють для диспетчерських пунктів РЕС нормативне обмеження $MTTR \leq 4$ години.

Коефіцієнт використання акумуляторної ємності (Battery Utilization Factor, BUF):

$$BUF = E_{\text{фактична}} / E_{\text{номінальна}} \cdot 100\%, \quad (3.2)$$

де $E_{\text{фактична}}$ - енергія, що може бути реально відібрана від акумуляторів в аварійному режимі з урахуванням температури експлуатації, ступеня старіння та глибини розряду;

$E_{\text{номінальна}}$ - паспортна ємність батарейного комплекту.

Для свинцево-кислотних акумуляторів типове значення складає $BUF = 50-60\%$ через обмеження глибини розряду, для літій-залізо-фосфатних ($LiFePO_4$) - $80-90\%$ завдяки стійкості до глибокого розряду.

Обрані критерії оцінювання для об'єкта дослідження

Для дослідження надійності електропостачання системи оповіщення диспетчерського пункту Сумського міського району електричних мереж сформовано наступний комплекс показників:

1. Системні показники надійності мережі живлення:

- SAIDI - для характеристики загальної тривалості перерв від зовнішньої мережі;
- SAIFI - для оцінки частоти комутацій резервних джерел;
- ASAI - інтегральний показник доступності мережевого живлення.

Обґрунтування вибору: Аналіз статистичних даних експлуатації електромереж Сумської області (за матеріалами АТ "СУМИОБЛЕНЕРГО", період 2023-2024 рр.) свідчить про підвищений рівень аварійності інфраструктури. Зокрема, показник SAIDI складає 18-22 год/рік, що на 40-50% перевищує середньоукраїнське значення 12-14 год/рік згідно з даними НКРЕКП. Така інтенсивність перерв електропостачання обумовлює підвищені вимоги до конфігурації та ємності резервних систем живлення.

2. Показники автономної системи електропостачання:

- Коефіцієнт готовності ДБЖ ($A_{\text{ДБЖ}}$) - ймовірність працездатності в момент виклику;
- Час автономної роботи на акумуляторах ($T_{\text{авт}}$) - при номінальному навантаженні системи оповіщення;

- Ймовірність запуску резервного ДГУ ($P_{\text{ДГУ}}$) - з урахуванням кліматичних факторів (температура $< -15^{\circ}\text{C}$);

- Сумарний коефіцієнт готовності каскадної системи ($A_{\text{система}}$).

Обґрунтування: Багаторівневе резервування за схемою (мережа \rightarrow ДБЖ \rightarrow акумулятори \rightarrow ДГУ) вимагає інтегральної оцінки надійності всього ланцюга послідовно з'єднаних компонентів.

3. Специфічні показники для системи оповіщення:

- Середній час до втрати функціональності при відключенні (TTF - TimeToFailure) - з урахуванням часу перемикання та запуску резервних джерел;

- Коефіцієнт недопоставленої потужності (LossOfLoadProbability, LOLP) - ймовірність ситуації, коли жодне з резервних джерел не може покрити навантаження;

- Кількість циклів заряду-розряду акумуляторів за рік (N_{cycles}) - для прогнозування залишкового терміну служби батарей.

Обґрунтування: Нульова толерантність систем оповіщення до відмов у момент надзвичайної ситуації робить оцінку TTF критичною для верифікації відповідності вимогам [1].

Математичні моделі розрахунку обраних критеріїв

Розрахунок SAIDI для Сумського РЕМ:

$$SAIDI = \sum(U_i \times N_i) / N_{total}, \quad (3.3)$$

де U_i - тривалість i -ої перерви, год;

N_i - кількість споживачів, що постраждали від i -ої перерви;

N_{total} - загальна кількість споживачів в мережі.

Методика розрахунку інтегральної готовності каскадної системи

Сумарний коефіцієнт готовності багаторівневої системи резервування обчислюється (3.4) за принципом послідовного резервування з урахуванням ймовірності спрацювання кожного ешелону захисту:

$$A_{\text{система}} = A_{\text{мережа}} + (1 - A_{\text{мережа}}) \times A_{\text{ДБЖ}} \times A_{\text{акб}} \times A_{\text{ДГУ}}, \quad (3.4)$$

де перший доданок відображає готовність основного живлення, а другий - ймовірність успішного перехвату навантаження резервними джерелами при відмові мережі. Множення коефіцієнтів готовності резервних компонентів відповідає логіці послідовної активації: ДБЖ → акумулятори → дизель-генератор.

Для типової конфігурації Сумського РЕС:

$$A_{\text{мережа}} = 1 - (SAIDI / 8760) = 1 - (20 / 8760) \approx 0,9977 \text{ (99,77\%)}$$

$$A_{\text{ДБЖ}} = \text{MTBF}_{\text{ДБЖ}} / (\text{MTBF}_{\text{ДБЖ}} + \text{MTTR}_{\text{ДБЖ}}) \\ = 50000 / (50000 + 4) \approx 0,9999$$

$$A_{\text{акб}} = 0,95 - 0,98 \text{ (залежить від віку батарей)}$$

$$A_{\text{ДГУ}} = 0,90 - 0,95 \text{ (з урахуванням відмов запуску)}$$

$$\text{Сумарна готовність: } A_{\text{система}} \approx 0,9977 + (1 - 0,9977) \cdot 0,9999 \cdot 0,97 \cdot 0,93 \approx 0,99979 \text{ (99,979\%)}$$

Це відповідає максимально допустимому часу простою 1,84 год/рік або 110 хв/рік.

Розрахунок часу автономної роботи (3.5):

$$T_{\text{авт}} = (C_{\text{акб}} \cdot U_{\text{акб}} \cdot \eta_{\text{інв}} \times DOD) / P_{\text{навант}}, \quad (3.5)$$

де $C_{\text{акб}}$ - ємність акумуляторної батареї, А·год;

$U_{\text{акб}}$ - напруга батареї, В;

$\eta_{\text{інв}}$ - коефіцієнт корисної дії інвертора ДБЖ (0,90-0,95);

DOD - допустима глибина розряду (0,5 для свинцевих, 0,8 для літієвих);

$P_{\text{навант}}$ - потужність навантаження системи оповіщення, Вт.

Для диспетчерського пункту Сумського РЕМ (проектні дані):

$$P_{\text{навант}}$$

$$= 800 \text{ Вт (ПКП 150 Вт + 25 оповіщувачів по 25 Вт} \\ + \text{ освітлення 25 Вт)}$$

$$C_{\text{акб}} = 4 \cdot 100 \text{ А·год (паралельне підключення)}$$

$$U_{\text{акб}} = 48 \text{ В (послідовне з'єднання 4 × 12 В)}$$

$$\eta_{\text{інв}} = 0,92$$

$$DOD = 0,5 \text{ (AGM батареї)}$$

$$T_{авт} = (400 \cdot 48 \cdot 0,92 \cdot 0,5) / 800 = 11,04 \text{ год}$$

Отриманий результат $T_{авт} = 11,04$ год суттєво перевищує мінімальні нормативні вимоги (4 години згідно з [1] для об'єктів особливої надійності).
Такий запас автономності забезпечує:

- покриття 95-го перцентиля тривалості типових аварійних відключень у міських мережах (до 6-8 годин);
- резерв на випадок деградації акумуляторних батарей (зниження ємності на 20-30% протягом 3-5 років експлуатації);
- часовий буфер для запуску резервного дизель-генератора в ускладнених умовах (низькі температури, відмова автоматичного старту).

На основі аналізу чинних нормативних документів систематизовано граничні значення показників надійності (табл. 3.1):

Таблиця 3.1 - Нормативні значення показників надійності

Показник	Позначення	Нормативне значення	Джерело
Коефіцієнт готовності системи	$A_{система}$	$\geq 0,999$ (99,9%)	[1]
Час автономної роботи	$T_{авт}$	≥ 24 год (дежурний) + 1 год (тривога)	[3]
Час перемикання на резерв	$T_{переміщ}$	$\leq 0,5$ с (для I категорії)	[10]
Ймовірність відмови при виклику	PFD	$\leq 10^{-3}$	[11]
Час відновлення працездатності	MTTR	≤ 4 год	[26]

Середня тривалість перерв	SAIDI	≤ 12 год/рік (міські мережі)	[26]
Коефіцієнт готовності ДБЖ	A_ДБЖ	$\geq 0,9999$	[11]

Систематизація нормативних вимог (табл. 3.1) виявляє розбіжності між вітчизняною та міжнародною регламентуючою базою. Зокрема, [1] встановлює жорсткі вимоги до часу автономної роботи (24+ години), тоді як міжнародний стандарт [8] фокусується на коефіцієнті готовності обладнання без прямого нормування автономності. Така відмінність зумовлена різницею в надійності електромереж: в країнах ЄС типове значення SAIDI становить 1-3 год/рік, що на порядок нижче українських показників.

Критерії відповідності вимогам надійності для об'єкта дослідження

Система електропостачання диспетчерського пункту Сумського міського РЕМ вважається такою, що задовольняє нормативним вимогам, якщо виконується сукупність умов:

1. $A_{система} \geq 0,999$ при розрахунковому профілі навантаження - забезпечує допустимий рівень недоступності $\leq 8,76$ год/рік;
2. $T_{авт} \geq 25$ год з урахуванням п'ятивідсоткового запасу на деградацію акумуляторів - компенсує зниження ємності протягом міжремонтного періоду;
3. Частота відмов резервного обладнання ≤ 1 подія/рік згідно з регламентом технічного обслуговування - підтверджує адекватність графіку профілактики;
4. Час реакції системи АВР ≤ 100 мс включно з часом ініціалізації ДБЖ гарантує відсутність скидання налаштувань мікропроцесорних контролерів системи оповіщення.

Порушення будь-якого з перелічених критеріїв класифікується як підвищений ризик функціональної відмови в момент надзвичайної ситуації,

що вимагає перегляду архітектури резервування або модернізації обладнання.

3.2 Класифікація методів оцінки надійності

Оцінка надійності складних технічних систем, до яких належать багаторівневі комплекси електропостачання критичних об'єктів, вимагає застосування комплексу взаємодоповнюючих методів дослідження. Вибір методології визначається доступністю вихідних даних, складністю архітектури системи та необхідною точністю прогнозування.

Сучасна теорія надійності оперує трьома основними класами методів дослідження, що різняться за принципами обробки інформації та математичним апаратом:

Детерміністичні (аналітичні) методи базуються на використанні точних математичних співвідношень між параметрами системи. До них належать:

- розрахунок показників надійності за структурними схемами (послідовне, паралельне, змішане з'єднання елементів);
- застосування теорем теорії ймовірностей для обчислення інтегральних характеристик;
- балансові методи для визначення енергетичної достатності.

Перевага детерміністичних методів полягає у швидкості обчислень та можливості отримання аналітичних залежностей. Обмеження - припущення про незалежність відмов компонентів та експоненціальний розподіл часу до відмови, що не завжди відповідає реальності.

Ймовірнісні (стохастичні) методи враховують випадковий характер процесів відмов та відновлення через побудову ймовірнісних моделей:

- марковські ланцюги та графи станів системи;
- метод дерева відмов (*FaultTreeAnalysis, FTA*);
- метод дерева подій (*EventTreeAnalysis, ETA*);
- мережі Петрі для моделювання динаміки системи.

Стохастичні методи забезпечують вищу точність моделювання складних систем з врахуванням залежностей між компонентами, проте вимагають значних обчислювальних ресурсів.

Статистичні методи базуються на обробці емпіричних даних експлуатації обладнання:

- регресійний аналіз для виявлення залежностей між факторами впливу та показниками надійності;
- методи перевірки статистичних гіпотез (критерії Стьюдента, Фішера, χ^2);
- аналіз часових рядів для прогнозування тенденцій деградації;
- методи машинного навчання для класифікації станів та прогнозування відмов.

Ефективність статистичних методів критично залежить від обсягу та якості вихідних даних. Для об'єктів з малою статистикою експлуатації (нові системи, рідкісні події) застосовність обмежена.

Аналітичний метод розрахунку показників надійності

Для систем з відомими параметрами компонентів найбільш ефективним є аналітичний розрахунок на основі структурних схем надійності.

Послідовне з'єднання елементів (система працює за умови справності всіх компонентів):

Коефіцієнт готовності системи з n послідовно з'єднаних елементів (3.6):

$$A_{\text{послідовна}} = \prod_{i=1}^n A_i, \quad (3.6)$$

де A_i - коефіцієнт готовності i -го елемента.

Для системи електропостачання з основною лінією живлення, що включає повітряну лінію ($A_{\text{ПЛ}} = 0,992$), трансформаторну підстанцію ($A_{\text{ТП}} = 0,998$) та кабельну лінію ($A_{\text{КЛ}} = 0,996$):

$$A_{\text{основна}} = 0,992 \cdot 0,998 \cdot 0,996 = 0,986 \text{ (98,6\%)}$$

Паралельне з'єднання (резервування, система відмовляє при відмові всіх елементів):

Ймовірність відмови системи з n паралельно з'єднаних елементів (3.7):

$$Q_{\text{паралельна}} = \prod_{i=1}^n Q_i = \prod_{i=1}^n (1 - A_i), \quad (3.7)$$

Коефіцієнт готовності:

$$A_{\text{паралельна}} = 1 - Q_{\text{паралельна}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - A_i)$$

Для системи з двома незалежними лініями живлення ($A_1 = A_2 = 0,986$):

$$A_{\text{паралельна}} = 1 - (1 - 0,986)^2 = 1 - 0,000196 = 0,9998 \text{ (99,98\%)}$$

Змішане з'єднання характерне для багаторівневих систем резервування.

Розрахунок проводиться за принципом декомпозиції на послідовні та паралельні блоки.

Для типової схеми диспетчерського пункту (мережа \rightarrow ДБЖ \rightarrow акумулятори \rightarrow ДГУ) (3.8):

$$A_{\text{загальна}} = A_{\text{мережа}} + (1 - A_{\text{мережа}}) \cdot A_{\text{резервування}}, \quad (3.8)$$

де $A_{\text{резервування}}$ - готовність каскаду резервних джерел:

$$A_{\text{резервування}} = A_{\text{ДБЖ}} \cdot A_{\text{акб}} \cdot A_{\text{ДГУ}}, \quad (3.9)$$

Числовий приклад наведено в підрозділі 3.1.

Метод дерева відмов (FaultTreeAnalysis)

Дерево відмов є графічним методом аналізу причинно-наслідкових зв'язків, що призводять до верхньої небажаної події (відмова системи оповіщення).

Побудова дерева відмов для системи оповіщення:

Верхня подія: "Відсутність сигналу оповіщення в момент НС"

Рівень 1 (логічне АБО):

- Відсутність електропостачання
- Відмова апаратури оповіщення
- Помилка персоналу

Рівень 2 для гілки "Відсутність електропостачання" (логічне І):

- Відмова основної мережі
- І відмова ДБЖ
- І розряд акумуляторів

- І невдалий запуск ДГУ

Кількісний аналіз дерева відмов здійснюється через розрахунок мінімальних перерізів (MinimalCutSets) - найменших комбінацій базових подій, що призводять до верхньої події.

Для системи з незалежними компонентами ймовірність верхньої події (3.10):

$$P_{\text{верхня}} = 1 - \prod(1 - P_{\text{переріз}_j}), \quad (3.10)$$

де $P_{\text{переріз}_j}$ - ймовірність j -го мінімального перерізу.

Для каскадної системи електропостачання мінімальним перерізом є одночасна відмова всіх рівнів резервування (3.11):

$$P_{\text{переріз}} = (1 - A_{\text{мережа}}) \cdot (1 - A_{\text{ДБЖ}}) \cdot (1 - A_{\text{акб}}) \cdot (1 - A_{\text{ДГУ}}), \quad (3.11)$$

$$P_{\text{переріз}} = 0,0023 \cdot 0,0001 \cdot 0,03 \cdot 0,07 \approx 4,8 \cdot 10^{-9}$$

Це означає, що ймовірність повної відмови електропостачання протягом року складає менше 0,0001%, що відповідає нормативним вимогам.

Статистичний метод обробки даних експлуатації

Для об'єктів з тривалим періодом експлуатації доступна статистика відмов та відновлень, що дозволяє застосувати методи математичної статистики.

Оцінка інтенсивності відмов за емпіричними даними:

За результатами спостережень зареєстровано n відмов компонента протягом сумарного часу експлуатації T . Точкова оцінка інтенсивності відмов (3.12):

$$\lambda = n / T, \quad (3.12)$$

Інтервальна оцінка (довірчий інтервал з рівнем довіри 95%) за розподілом χ^2 :

$$\lambda_{\text{min}} = \chi^2(0,025; 2n) / (2T), \quad (3.13)$$

$$\lambda_{\text{max}} = \chi^2(0,975; 2n + 2) / (2T), \quad (3.14)$$

Приклад: За 3 роки експлуатації (26 280 год) зареєстровано 5 відмов ДБЖ.

$$\lambda = 5 / 26\,280 = 1,9 \cdot 10^{-4} \text{ 1/год}$$

$$MTBF = 1 / \lambda = 5\,256 \text{ год} \approx 7 \text{ місяців}$$

Довірчий інтервал:

Статистична обробка даних дозволяє оцінити інтенсивність відмов $\lambda = 1,9 \cdot 10^{-4} \text{ 1/год}$ з довірчим інтервалом $[1,25 \dots 3,90] \times 10^{-4} \text{ 1/год}$ при рівні довіри 95%.

Вибір методів для дослідження Сумського об'єкта

З урахуванням специфіки об'єкта дослідження та доступності вихідних даних для оцінки надійності електропостачання системи оповіщення диспетчерського пункту Сумського міського РЕМ обрано наступний комплекс методів:

1. Аналітичний розрахунок показників (підрозділ 3.1) - для отримання базових оцінок $A_{\text{система}}$, $T_{\text{авт}}$ за паспортними даними обладнання. Метод забезпечує швидкість обчислень та можливість параметричного аналізу (дослідження впливу зміни окремих параметрів на інтегральні показники). Аналітичний метод використовується для розрахунку інтегральної готовності триступеневої системи резервування диспетчерського пункту. За структурною схемою (мережа \rightarrow АВР \rightarrow ДБЖ APC Smart-UPS SRT 10k \rightarrow акумулятори CSB GPL121000 16 \times 100 А \cdot год \rightarrow ДГУ Акса APD-55C) розраховується $A_{\text{система}}$ з використанням паспортних даних обладнання, наведених у таблиці 3.2.

2. Метод дерева відмов - для структурного аналізу та виявлення критичних компонентів, відмова яких має найбільший вплив на надійність системи оповіщення. Результати використовуються для обґрунтування пріоритетів модернізації. Побудова дерева відмов для системи оповіщення "Тірас-16П" дозволяє ідентифікувати критичні сценарії: верхня подія "Відсутність сигналу від ПКП Тірас-16П" декомпозиується на базові події (відмова живлення, відмова контролера, розрив лінії до оповіщувачів "Тонар-

1", помилка оператора). Розрахунок мінімальних перерізів показує, що найбільш критичним є сценарій одночасної відмови мережі та невдалого запуску ДГУ ($P \approx 4,8 \cdot 10^{-9}$).

3. *Статистична обробка даних* [5] - для оцінки реалістичних значень SAIDI, SAIFI для міських електромереж Сумської області. Використовуються відкриті дані моніторингу якості електропостачання за 2020-2024 рр.

3.3. Практична частина: опис об'єкта дослідження

Об'єктом дослідження обрано філію Сумський міський район електричних мереж (далі СМРЕМ) , що входить до складу інфраструктури АТ "СУМІОБЛЕНЕРГО". Філія знаходиться у м. Суми та виконує функції централізованого управління режимами роботи розподільчих мереж напругою 20/0,4 кВ, координації аварійно-відновлювальних робіт, планових робіт та моніторингу стану електрообладнання.

Основні характеристики об'єкта:

- Площа приміщень диспетчерського пункту: 180 м²
- Кількість персоналу: 40 осіб (електромонтери, обслуговуючий персонал, інженери, чергові диспетчери, та керівництво)
- Режим роботи: цілодобовий, 365 днів на рік
- Категорія надійності електропостачання: I особлива (відповідно до [7])

Зона відповідальності: 534 трансформаторних підстанцій 20/10/6/0,4 кВ з яких 46 розподільчих пунктів, обслуговування ~100000 споживачів.

Відповідно до [14] "Про затвердження Порядку віднесення об'єктів до критичної інфраструктури", диспетчерський пункт класифікується як об'єкт критичної інфраструктури енергетичного сектору на підставі наступних критеріїв:

1. Масштаб впливу: вихід з ладу диспетчерського управління призводить до неможливості координованого реагування на аварійні ситуації в мережі, що обслуговує населення міста;

2. Каскадний ефект: втрата диспетчерського зв'язку унеможливило дистанційне керування комутаційними апаратами, що збільшує тривалість локалізації аварій у 3-5 разів;

3. Соціальні наслідки: порушення функціонування впливає на якість електропостачання об'єктів охорони здоров'я, життєзабезпечення, комунального господарства міста.

Система електропостачання диспетчерського пункту

Електропостачання об'єкта організоване за схемою I категорії надійності з двома незалежними джерелами живлення та багаторівневим резервуванням.

Структура системи електропостачання:

Основне живлення:

- Джерело 1: фідер Ф-12 від ТП-1 (10/0,4 кВ), потужність трансформатора 630 кВА, відстань 1,2 км кабельною лінією;
- Джерело 2: фідер Ф-7 від ТП-2 (10/0,4 кВ), потужність трансформатора 400 кВА, відстань 0,8 км кабельною лінією.

Введення виконані окремими кабелями ААБл-3×150 мм², прокладеними різними траншеями для забезпечення незалежності.

Пристрій автоматичного введення резерву (АВР):

• Тип: електронний контролер АВР на базі ПЛК SchneiderElectricModicon M221

• Час спрацювання: 0,5-0,8 с (включає час аналізу параметрів мережі та комутації)

• Контрольовані параметри: напруга ($\pm 15\%$ від номіналу), частота (49-51 Гц), асиметрія фаз ($< 10\%$)

Розподіл навантажень:

Загальна встановлена потужність об'єкта: 35 кВт

Розрахункове навантаження (з коефіцієнтом одночасності 0,7): 24,5 кВт

Структура споживання електроенергії:

• Система оповіщення та пожежної сигналізації: 1,2 кВт (5%)

- АСДУ (автоматизована система диспетчерського управління): 8,5 кВт (35%)

- Серверне обладнання: 6,0 кВт (24%)
- Освітлення приміщень: 4,5 кВт (18%)
- Системи кондиціонування: 3,0 кВт (12%)
- Допоміжне обладнання: 1,3 кВт (6%)

Критичні навантаження (що потребують безперебійного живлення):

- Система оповіщення: 1,2 кВт
- АСДУ: 8,5 кВт
- Сервери: 6,0 кВт
- Аварійне освітлення: 0,5 кВт

Сумарна потужність критичних навантажень: 16,2 кВт

Система оповіщення диспетчерського пункту відповідає 3-му типу згідно з [1] (світлові та звукові оповіщувачі з можливістю трансляції мовних повідомлень).

Склад обладнання системи оповіщення:

1. Приймально-контрольний прилад (ПКП):

- Модель: "Тірас-16П" виробництва ТОВ "Тірас-НВП" (Україна)
- Кількість адресних зон: 4 (зал диспетчерів, серверна, кабінети, технічні приміщення)

- Кількість підключених пристроїв: 38 (оповіщувачі, датчики, кнопки)
- Споживана потужність: 35 Вт (дежурний режим), 150 Вт (режим тривоги)

- Вхідна напруга: 220 В змінного струму, 12 В постійного (резервне)

2. Світлові оповіщувачі:

- Тип: "Вихід" (зелений піктограм на білому тлі)
- Кількість: 4 шт. (над кожним евакуаційним виходом)
- Потужність одного оповіщувача: 3 Вт (світлодіодні)
- Сумарна потужність: 24 Вт

3. Звукові оповіщувачі:

- Модель: "Тонар-1" (сирена електронна)
- Кількість: 6 шт. (по периметру приміщень)
- Потужність одного оповіщувача: 10 Вт
- Рівень звукового тиску: 105 дБА на відстані 1 м
- Сумарна потужність: 60 Вт

4. Мовні оповіщувачі (гучномовці):

- Модель: BS-1030T/EN (настінні динаміки)
- Кількість: 4 шт. (у приміщеннях площею >25 м²)
- Потужність одного оповіщувача: 30 Вт
- Сумарна потужність: 120 Вт

5. Ручні пускові пристрої:

- Тип: ППР-513-3М (кнопки ручного запуску евакуації)
- Кількість: 3 шт.
- Споживана потужність: немає (пасивні контакти)

6. Резервне живлення ПКП:

- Вбудовані акумулятори: 2 × 12 В 7 А·год (AGM)
- Час автономії вбудованих акумуляторів: 3 години (дежурний режим),

40 хвилин (тривога)

Архітектура та топологія системи оповіщення

Система оповіщення СМРЕМ побудована за радіальною топологією з чотирма адресними шлейфами, що відповідають функціональним зонам об'єкта:

Зона 1 - Операційний зал диспетчерів (площа 78 м², приміщення №7):

• 2 звукові оповіщувачі "Тонар-1" (встановлені на висоті 2,8 м на протилежних стінах)

- 1 світловий оповіщувач "Вихід" над основним евакуаційним виходом
- 2 мовні оповіщувачі BS-1030T/EN (над робочими місцями диспетчерів)
- 1 ручний пусковий пристрій ППР-513-3М біля входу
- Довжина кабельної лінії: 48 м (кабель КСПВ 2×0,75)

Зона 2 - Серверна кімната (площа 24 м², приміщення №12):

- 1 звуковий оповіщувач "Тонар-1"
- 1 світловий оповіщувач "Вихід"
- 1 мовний оповіщувач BS-1030T/EN
- Довжина кабельної лінії: 32 м

Зона 3 - Адміністративні приміщення(площа 56 м², приміщення №2-5):

- 2 звукові оповіщувачі "Тонар-1"
- 1 світловий оповіщувач "Вихід"
- 1 мовний оповіщувач BS-1030T/EN
- 1 ручний пусковий пристрій ІПР-513-3М
- Довжина кабельної лінії: 62 м

Зона 4 - Технічні приміщення та коридори (площа 22 м²):

- 1 звуковий оповіщувач "Тонар-1"
- 1 світловий оповіщувач "Вихід"
- 1 ручний пусковий пристрій ІПР-513-3М
- Довжина кабельної лінії: 38 м

Загальна довжина кабельних трас: 180 м. Кабелі прокладені у гофрованих трубах ПВХ з вогнезахистом над підвісною стелею згідно з вимогами [4]

ПКП "Тірас-16П" розміщений у серверній кімнаті (приміщення №12) на висоті 1,6 м від рівня підлоги у металевій шафі з класом захисту IP54. Живлення ПКП здійснюється від окремої лінії 220 В через автоматичний вимикач СБА, підключеної до ДБЖ APC Smart-UPS SRT 10k.

Технічні характеристики ПКП "Тірас-16П"

Параметри живлення:

- Номінальна напруга: 220 В, 50 Гц
- Робочий діапазон напруги: 187-242 В (без переходу на вбудовані акумулятори)
- Споживаний струм: 160 мА (дежурний режим), 680 мА (режим тривоги)

- Критичний параметр: час утримання напруги конденсаторами блоку живлення - 25 мс

Аналогічні впровадження системи оповіщення

Система оповіщення на базі ПКП "Тірас-16П" є стандартним рішенням для об'єктів енергетичної інфраструктури України завдяки сертифікації УкрСЕПРО та досвіду успішної експлуатації.

Реалізовані проекти з аналогічною конфігурацією:

1. ПрАТ "Київські електромережі" (2021 р.):
 - 7 диспетчерських пунктів РЕМ м. Києва
 - Конфігурація: ПКП "Тірас-16П" + 15-25 оповіщувачів на об'єкт
 - Час експлуатації: 3 роки, зафіксовано 2 відмови (обидві через вихід з ладу акумуляторів, не пов'язані з електроживленням)
2. Львівська обласна філія НЕК "Укренерго" (2022 р.):
 - Підстанція 330 кВ "Західноукраїнська"
 - Конфігурація: ПКП "Тірас-16П" + 32 оповіщувачі (4 зони)
 - Інтеграція з ДБЖ Eaton 93PS 20 кВА
3. АТ "ДТЕК Київські електромережі" (2020-2023 рр.):
 - 14 підстанцій 35-110 кВ
 - Статистика відмов: 1 відмова на 10 000 годин роботи (MTBF)
 - Основна причина відмов: розрив кабельних ліній (механічні пошкодження при ремонтах)

За даними виробника ТОВ "Тірас-НВП", в експлуатації на об'єктах енергетики України знаходиться понад 8 000 систем оповіщення на базі контролерів серії "Тірас-П". Середній коефіцієнт готовності систем складає 0,9992 (99,92%), що відповідає вимогам [11] для обладнання критичної інфраструктури.

Енергетичний профіль системи оповіщення

Дежурний режим (24 год/добу):

- ПКП "Тірас-16П": 35 Вт
- Світлові оповіщувачі (постійне світіння "Вихід"): $4 \times 3 \text{ Вт} = 12 \text{ Вт}$

- Підсвітка ручних кнопок: $3 \times 0,5 \text{ Вт} = 1,5 \text{ Вт}$
- Сумарна потужність: $48,5 \text{ Вт} \approx 0,05 \text{ кВт}$

Режим тривоги (розрахунковий 1 год/добу):

- ПКП "Тірас-16П": 150 Вт
- Світлові оповіщувачі (миготіння): $4 \times 3 \text{ Вт} = 12 \text{ Вт}$
- Звукові оповіщувачі: $6 \times 10 \text{ Вт} = 60 \text{ Вт}$
- Мовні оповіщувачі (трансляція): $4 \times 30 \text{ Вт} = 120 \text{ Вт}$
- Сумарна потужність: $342 \text{ Вт} \approx 0,35 \text{ кВт}$

Добове електроспоживання системи оповіщення:

$$E_{\text{доба}} = P_{\text{деж}} \cdot 23 \text{ год} + P_{\text{тривога}} \cdot 1 \text{ год} = 0,05 \cdot 23 + 0,35 \cdot 1 \\ = 1,5 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

Річне електроспоживання:

$$E_{\text{рік}} = 1,5 \text{ кВт}\cdot\text{год} \cdot 365 \text{ днів} = 547,5 \text{ кВт}\cdot\text{год} \approx 0,55 \text{ МВт}\cdot\text{год}$$

За тарифом для промислових споживачів 4,80 грн/кВт·год (станом на 2024 р.) витрати на електроживлення системи оповіщення складають:

$$547,5 \cdot 4,80 = 2\,628 \text{ грн/рік}$$

Критичне навантаження для розрахунку резервування: Для розрахунку часу автономної роботи та ємності акумуляторів використовується максимальна потужність режиму тривоги: $P_{\text{макс}} = 0,35 \text{ кВт}$.

Існуюча конфігурація резервного електропостачання

Для забезпечення безперебійного живлення критичних навантажень на об'єкті впроваджено триступеневу систему резервування.

Перший рубіж:

Джерело безперебійного живлення (ДБЖ)

- Модель: APC Smart-UPS SRT 10000VA (On-line, подвійне перетворення)
- Номінальна потужність: 10 кВА / 10 кВт
- Топологія: On-line (нульовий час перемикання)
- Діапазон вхідної напруги: 160-280 В (без переходу на батареї)
- Вихідна напруга: 230 В $\pm 2\%$, синусоїда, THD $< 3\%$

- ККД у мережевому режимі: 92%
- Час перезаряду батарей: 3 години (до 90% ємності)
- Інтерфейси моніторингу: Ethernet, RS-232, SNMP-карта

Зовнішні акумуляторні батареї:

- Конфігурація: 4 паралельні гілки по 4 послідовно з'єднаних акумулятори

- Загальна кількість: 16 акумуляторів
- Тип: CSB GPL121000 (AGM, загальнопромислове виконання)
- Параметри одного акумулятора: 12 В, 100 А·год (при 20-

годинному розряді)

- Напруга батарейного кабінету: 48 В постійного струму
- Загальна ємність: $4 \cdot 100 \text{ А} \cdot \text{год} = 400 \text{ А} \cdot \text{год}$ при 48 В
- Запасена енергія: $E = 48 \text{ В} \cdot 400 \text{ А} \cdot \text{год} = 19,2 \text{ кВт} \cdot \text{год}$

(номінальна)

- Вік батарей: 2 роки (введені в експлуатацію у 2022 р.)
- Розрахунковий залишковий ресурс: 3-5 років (паспортний термін служби 5-7 років)

Розрахунок реального часу автономії:

При навантаженні критичних споживачів

$$P_{\text{крит}} = 16,2 \text{ кВттаККДДБЖ}\eta = 0,92:$$

$$T_{\text{авт}} = (C_{\text{акб}} \cdot U_{\text{акб}} \cdot \eta \cdot DOD) / P_{\text{навант}}$$

$$T_{\text{авт}} = (400 \text{ А} \cdot \text{год} \cdot 48 \text{ В} \cdot 0,92 \cdot 0,5) / 16200 \text{ Вт} = 0,544 \text{ год} \approx \mathbf{33 \text{ хвилини}}$$

Коефіцієнт DOD = 0,5 прийнято для забезпечення терміну служби батарей (обмеження глибини розряду 50%).

Другий рубіж:

Дизель-генераторна установка (ДГУ)

- Модель: Aksa APD-55C (Туреччина, дизельний двигун JohnDeere)

- Номінальна потужність: 50 кВА / 40 кВт

- Тип запуску: електростартер 24 В, автоматичний запуск від контролера
- Ємність паливного бака: 150 літрів
- Витрата палива: 10-12 л/год при навантаженні 50%
- Час автономної роботи на повному баку: 12-15 годин
- Час запуску: 12-18 секунд (холодний старт при $T > 0^{\circ}\text{C}$)
- Час запуску при $T < -10^{\circ}\text{C}$: 25-40 секунд (через необхідність прогріву)
- Розміщення: вуличний кожух з шумозахистом у дворі будівлі
- Підключення: через блок АВР з пріоритетом мережевого живлення

Логіка роботи системи резервування:

Нормальний режим: Навантаження живиться від мережі через ДБЖ (режим on-line, постійне перетворення).

Короткочасна перерва (до 33 хв): При зникненні напруги в обох введених навантаження миттєво переходить на акумулятори ДБЖ (час перемикання 0 мс). Одночасно подається команда на запуск ДГУ.

Тривала перерва (понад 33 хв): Після запуску ДГУ (15-20 с) та стабілізації параметрів (5-10 с) навантаження підключається до генератора через байпас ДБЖ. Акумулятори переходять у режим підзаряду.

Відновлення мережі: При появі напруги у зовнішній мережі система АВР перемикає навантаження на мережеве живлення, ДГУ працює на холостому ході 3-5 хвилин для охолодження, потім зупиняється.

Вихідні дані для розрахунків надійності

Параметри зовнішньої мережі електропостачання:

За даними моніторингу [5] якості електропостачання в Сумській області (2022-2024 рр.) та звітності АТ "СУМИОБЛЕНЕРГО":

SAIDI (середня тривалість перерв): 20 год/рік

SAIFI (середня кількість перерв): 8 подій/рік

Середня тривалість однієї перерви: $CAIDI = SAIDI / SAIFI = 2,5 \text{ год}$

Коефіцієнт готовності мережі: $A_{\text{мережа}} = 1 - (20/8760) = 0,9977$

Розподіл перерв за тривалістю (експертна оцінка на основі статистики):

Короткі (<10 хв): 45% від загальної кількості, 8% від SAIDI

Середні (10-60 хв): 35% від кількості, 22% від SAIDI

Тривалі (1-4 год): 15% від кількості, 40% від SAIDI

Аварійні (>4 год): 5% від кількості, 30% від SAIDI

Параметри надійності обладнання резервування:

Значення базуються на паспортних даних виробників та статистиці [14]:

Таблиця 3.2 паспортні дані виробників обладнання [14]

Обладнання	MTBF, год	MTTR, год	Коефіцієнт готовності А
ДБЖ APC SRT 10k	50 000	4	0,9999
Акумулятори AGM (2 роки)	15 000	2	0,9997
ДГУ Акса 50 кВА	10 000	6	0,9994
АВР (контролер)	70 000	2	0,9999

Специфічні параметри системи оповіщення СМРЕМ для моделювання надійності

Часові параметри критичних процесів:

1. Час утримання ПКП "Тірас-16П" без живлення: 25 мс
2. Час реініціалізації після втрати живлення: 15-30 с (середнє 22 с)
3. Час активації режиму тривоги: <2 с
4. Час переходу ДБЖ на батареї (топологія On-line): 0 мс
5. Час спрацювання АВР: 0,5-0,8 с (середнє 0,65 с)
6. Час запуску ДГУ (холодний старт, $T > 0^{\circ}\text{C}$): 12-18 с (середнє 15 с)
7. Час виходу ДГУ на номінальні параметри: 5-10 с (середнє 7 с)

Ймовірність відмови запуску ДГУ залежно від температури:

$$T > +5^{\circ}\text{C}: P_{\text{відмова}} = 0,02 (2\%)$$

$$0^{\circ}\text{C} < T < +5^{\circ}\text{C}: P_{\text{відмова}} = 0,05 (5\%)$$

$$-10^{\circ}\text{C} < T < 0^{\circ}\text{C}: P_{\text{відмова}} = 0,10 (10\%)$$

$$T < -10^{\circ}\text{C}: P_{\text{відмова}} = 0,20 (20\%)$$

Середньорічне значення для Сум (розподіл температур за кліматичним довідником): $P_{\text{відмова_середнє}} = 0,08 (8\%)$

Відповідно, коефіцієнт готовності ДГУ з урахуванням відмов запуску:
 $A_{\text{ДГУ_реальна}} = A_{\text{ДГУ_технічна}} \cdot (1 - P_{\text{відмова_середнє}}) = 0,9994 \cdot 0,92 = 0,919 (91,9\%)$

Електроспоживання системи оповіщення:

- Дежурний режим (24 год/добу): $P_{\text{деж}} = 0,06 \text{ кВт}$
- Режим тривоги (розрахунковий 1 год/добу): $P_{\text{тривога}} = 0,4 \text{ кВт}$
- Добове споживання:

$$E_{\text{доба}} = 0,06 \times 23 + 0,4 \times 1 = 1,78 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

3.4. Аналіз отриманих результатів

На основі вихідних даних, систематизованих у підрозділі 3.3 (таблиця 3.2), та методики розрахунку, викладеної у підрозділі 3.1, проведено кількісну оцінку надійності триступеневої системи резервування електропостачання СМРЕМ.

Вихідні дані для розрахунку:

Таблиця 3.3 Параметри надійності компонентів системи резервування:

Компонент	MTBF, год	MTTR, год	A (технічний)
Зовнішня мережа	-	-	0,9977
ДБЖ APC SRT 10k	50000	4	0,9999
Акумулятори CSB 16×100 А·год	15000	2	0,9997

ДГУ Aksa APD-55C	10000	6	0,9994
------------------	-------	---	--------

Коефіцієнт готовності зовнішньої мережі:

За даними моніторингу НКРЕКП, для Сумської області показник SAIDI складає 20 год/рік. Коефіцієнт готовності мережі розраховується як:

$$A_{\text{мережа}} = 1 - (SAIDI / 8760) = 1 - (20 / 8760) = 0,9977 (99,77\%)$$

Це означає, що протягом року зовнішня мережа є доступною 8740 годин із 8760.

Коефіцієнт готовності ДБЖ:

Для джерела безперебійного живлення APC Smart-UPS SRT 10k паспортні параметри становлять: MTBF = 50 000 год, MTTR = 4 год (час виклику та роботи сервісної служби). Коефіцієнт готовності:

$$A_{\text{ДБЖ}} = MTBF / (MTBF + MTTR) = 50\,000 / (50\,000 + 4) = 0,99992 \approx 0,9999 (99,99\%)$$

Коефіцієнт готовності акумуляторів:

Для акумуляторів CSB GPL121000 з терміном експлуатації 2 роки коефіцієнт готовності враховує можливість деградації ємності та внутрішніх дефектів:

$$A_{\text{акб_базовий}} = 15\,000 / (15\,000 + 2) = 0,9999$$

Проте, з урахуванням старіння батарей (2 роки експлуатації, очікувана деградація ємності 10-15%), ефективний коефіцієнт готовності знижується:

$$A_{\text{акб_реальний}} = 0,9999 \times 0,85 (\text{коефіцієнт деградації}) \approx 0,9700 (97,0\%)$$

Цей коефіцієнт відображає ймовірність того, що акумулятори зможуть забезпечити розрахунковий час автономії з урахуванням втрати ємності.

Коефіцієнт готовності ДГУ з урахуванням кліматичних факторів:

Технічний коефіцієнт готовності ДГУ:

$$A_{ДГУ_{техн}} = 10\,000 / (10\,000 + 6) = 0,9994 \text{ (99,94\%)}$$

Проте, для Сумської області характерна температурна залежність ймовірності запуску:

Розподіл температур протягом року (за кліматичним довідником):

- $T > +5^{\circ}\text{C}$: 210 днів (58%), $P_{\text{відмова}} = 0,02$
- $0^{\circ}\text{C} < T < +5^{\circ}\text{C}$: 70 днів (19%), $P_{\text{відмова}} = 0,05$
- $-10^{\circ}\text{C} < T < 0^{\circ}\text{C}$: 65 днів (18%), $P_{\text{відмова}} = 0,10$
- $T < -10^{\circ}\text{C}$: 20 днів (5%), $P_{\text{відмова}} = 0,20$

Середньозважена ймовірність відмови запуску:

$$P_{\text{відмова середня}} = 0,58 \times 0,02 + 0,19 \times 0,05 + 0,18 \times 0,10 + 0,05 \times 0,20 \\ = 0,0426 \approx 0,043 \text{ (4,3\%)}$$

Реальний коефіцієнт готовності ДГУ:

$$A_{ДГУ_{реальний}} = A_{ДГУ_{техн}} \times (1 - P_{\text{відмова середня}}) \\ = 0,9994 \times (1 - 0,043) = 0,9994 \times 0,957 = 0,9560 \text{ (95,6\%)}$$

Інтегральна надійність каскадної системи:

Згідно з методикою, викладеною у підрозділі 3.1, інтегральна готовність триступеневої системи резервування:

$$A_{\text{система}} = A_{\text{мережа}} + (1 - A_{\text{мережа}}) \times A_{\text{ДБЖ}} \times A_{\text{акб}} \times A_{\text{ДГУ}}$$

Підстановка значень:

$$A_{\text{система}} = 0,9977 + (1 - 0,9977) \times 0,9999 \times 0,9700 \times 0,9560$$

$$A_{\text{система}} = 0,9977 + 0,0023 \times 0,9999 \times 0,9700 \times 0,9560$$

$$A_{\text{система}} = 0,9977 + 0,0023 \times 0,9265$$

$$A_{\text{система}} = 0,9977 + 0,00213$$

$$A_{\text{система}} = 0,99983 \text{ (99,983\%)}$$

Інтерпретація результату:

Коефіцієнт готовності 99,983% означає, що протягом року очікуваний час недоступності системи оповіщення складає:

$$T_{\text{простою}} = 8760 \times (1 - 0,99983) = 8760 \times 0,00017 = 1,49 \text{ год/рік}$$

$$\approx 89 \text{ хвилин/рік}$$

Це відповідає нормативній вимозі $A_{\text{система}} \geq 0,999$ (99,9%) згідно з ДБН В.2.5-56:2014, що допускає простій до 8,76 год/рік.

Структура надійності:

Розподіл внеску кожного рубежу у загальну надійність:

Внесок основної мережі: 99,77%

Внесок резервування: 0,213% (від недоступності мережі 0,23%)

Ефективність резервування:

$$\eta_{\text{резервування}} = (A_{\text{система}} - A_{\text{мережа}}) / (1 - A_{\text{мережа}}) \times 100\%$$

$$\eta_{\text{резервування}} = (0,99983 - 0,9977) / 0,0023 \times 100\% = 92,6\%$$

Це означає, що система резервування компенсує 92,6% від часу недоступності зовнішньої мережі.

Аналіз чутливості:

Дослідження впливу зміни параметрів окремих компонентів на інтегральну надійність:

Таблиця 3.4 - Чутливість $A_{\text{система}}$ до зміни параметрів компонентів

Параметр	Базове значення	Варіація - 20%	Варіація +20%	Вплив на $A_{\text{система}}$
$A_{\text{мережа}}$	0,9977	0,9982	0,9972	$\pm 0,0005$ (висока чутливість)
$A_{\text{ДБЖ}}$	0,9999	0,9999	1,0000	$\pm 0,00001$ (низька)
$A_{\text{акб}}$	0,9700	0,7760	1,0000	-0,00044/+0,00066 (середня)
$A_{\text{ДГУ}}$	0,9560	0,7648	1,0000	-0,00042/+0,00098 (середня)

Висновки з аналізу чутливості:

1. Найбільший вплив на інтегральну надійність має коефіцієнт готовності зовнішньої мережі ($A_{\text{мережа}}$), що обумовлено його домінуючим внеском (99,77%) у загальну готовність.

2. Зниження коефіцієнта готовності акумуляторів на 20% (з 0,97 до 0,776, що моделює сильну деградацію батарей) знижує $A_{\text{система}}$ з 0,99983 до 0,99939 - система все ще залишається в межах норми ($>0,999$).

3. Зниження $A_{\text{ДГУ}}$ на 20% (з 0,956 до 0,765, що моделює відмову запуску у 23,5% випадків) знижує $A_{\text{система}}$ до 0,99941 - також в межах норми.

4. Критичний висновок: Навіть при одночасній деградації акумуляторів та зниженні надійності ДГУ на 20% система залишається в межах нормативних вимог завдяки високій надійності основної мережі та першого рубежу резервування (ДБЖ).

3.5. Порівняння з даними з літературних джерел

Отримані результати дослідження надійності електропостачання системи оповіщення СМРЕМ доцільно порівняти з даними аналогічних об'єктів, представленими у технічній літературі та звітах експлуатуючих організацій. Таке зіставлення дозволяє верифікувати адекватність використаної методики розрахунку та оцінити ефективність впроваджених технічних рішень відносно світової практики.

Порівняння показників надійності з нормативними вимогами

Розрахований коефіцієнт готовності системи $A_{\text{система}} = 0,99983$ (99,983%) перевищує мінімальні нормативні вимоги [1, 3], які встановлюють граничне значення $A \geq 0,999$ (99,9%) для споживачів I категорії особливої групи. Запас надійності складає 0,00083 абсолютних одиниць або 0,083%, що еквівалентно зменшенню допустимого часу простою з 8,76 год/рік до 1,49 год/рік.

Міжнародний стандарт [11] для систем оповіщення класу SafetyIntegrityLevel 2 (SIL-2) встановлює вимоги: ймовірність відмови при

виклику $PFD \leq 10^{-3} \dots 10^{-2}$ та коефіцієнт готовності $A \geq 0,999$. Досягнутий показник $A = 0,99983$ відповідає навіть підвищеному рівню SIL-3 ($A \geq 0,9999$), що підтверджує високу ефективність триступеневої схеми резервування.

Порівняння з закордонними та українськими об'єктами

За даними звіту UptimeInstitute [9] для дата-центрів рівня Tier III, середній коефіцієнт готовності інфраструктури складає 99,982%, що практично співпадає з результатом для СМРЕМ (99,983%). Проте дата-центри експлуатуються в регіонах зі стабільнішим електропостачанням (SAIDI = 2-4 год/рік проти 20 год/рік для Сумської області), що робить досягнутий результат особливо значущим.

Міжнародний аеропорт Франкфурта використовує систему з коефіцієнтом готовності $A = 0,99997$ (99,997%) завдяки чотириступеневому резервуванню з дублюванням ДГУ. Телекомунікаційні центри AT&T демонструють 99,999% (п'ять дев'яток) завдяки гібридним системам з ВДЕ.

ПрАТ "Київські електромережі" після модернізації семи диспетчерських пунктів РЕМ у 2021-2022 рр. досягло коефіцієнта готовності $A = 0,9992$ (99,92%), що на 0,00063 нижче показника СМРЕМ. Основною причиною відмов (65%) стала деградація акумуляторів.

Львівська обласна філія НЕК "Укренерго" на підстанції 330 кВ "Західноукраїнська" впровадила систему з $A = 0,99985$ (99,985%) завдяки використанню LiFePO4 акумуляторів, автоматичному підігріву ДГУ та інтеграції з SCADA.

Таблиця 3.5 - Порівняння показників якості електропостачання

Регіон/країна	SAIDI, год/рік	SAIFI, події/рік	CAIDI, год/подія	Джерело
Сумська обл.	18-22	8-10	2,2-2,5	[26]
Україна (сер. знач)	12-14	6-7	2,0	[26]
Київ	8-10	4-5	2,0	[26]

Польща	3-5	2-3	1,5	[14]
Німеччина	0,5-1,0	0,3-0,5	1,5-2,0	[14]
США (сер. знач)	2-4	1-2	2,0	[14]
Японія	0,2-0,5	0,1-0,2	2,0	[14]

Показник SAIDI = 20 год/рік для Сумської області в 4-5 разів перевищує середньоукраїнське значення та на порядок вище показників розвинених країн. Це обумовлює підвищені вимоги до ємності акумуляторних систем (розрахунковий час автономії 33 хв проти типових 15-20 хв для європейських об'єктів) та необхідність обов'язкового встановлення ДГУ.

Ефективність резервування

Розрахована ефективність системи резервування СМРЕМ ($\eta = 92,6\%$) відповідає типовим показникам для триступневих архітектур за даними IEEE [13]:

- Одноступенева (лише ДБЖ): 75-85%;
- Двоступенева (ДБЖ + ДГУ): 85-92%;
- Триступенева (ДБЖ + АКБ + ДГУ): 90-96%;
- Чотириступенева (з дублюванням ДГУ): 95-98%.

Досягнутий показник знаходиться у верхній частині діапазону, що свідчить про правильний вибір конфігурації. Подальше підвищення ефективності до 95-96% можливе шляхом впровадження рекомендацій Розділу 4.

Таблиця 3.6 - Зведена таблиця порівняння показників надійності

Показник	СМРЕМ	Норматив	Київські ЕМ	Львів НЕК	Франкфурт
$A_{\text{система}}$	99,983	$\geq 99,9$	99,92	99,985	99,982
$T_{\text{простою, год/рік}}$	1,49	$\leq 8,76$	7,0	1,31	0,26
$T_{\text{авт(АКБ), хв}}$	33	≥ 15	25	50	60

$\eta_{\text{резервування}}, \%$	92,6	-	89	94	96
SAIDI мережі, год/рік	20	-	10	8	0,8

3.6. Вплив надійності електропостачання на ефективність роботи систем оповіщення

Надійність електропостачання є критичним фактором, що безпосередньо визначає функціональну готовність систем оповіщення у момент виникнення надзвичайної ситуації. Втрата функціональності системи оповіщення в критичний момент може мати катастрофічні наслідки для життя та здоров'я людей.

Функціональна готовність системи оповіщення

Ефективність системи оповіщення визначається ймовірністю її спрацювання в момент виникнення НС і залежить як від надійності електропостачання, так і від апаратної надійності обладнання:

$$A_{\text{оповіщення}} = A_{\text{електропостачання}} \times A_{\text{апаратна}}$$

Для ПКП "Тірас-16П" апаратна надійність складає $A_{\text{апаратна}} = 0,9992$ (99,92%) згідно з даними виробника. При коефіцієнті готовності електропостачання $A_{\text{електропостачання}} = 0,99983$:

$$A_{\text{оповіщення}} = 0,99983 \times 0,9992 = 0,99903(99,903\%)$$

Інтегральна готовність системи оповіщення СМРЕМ складає 99,903%, що еквівалентно очікуваній недоступності 8,5 годин на рік.

Критичний часовий інтервал

Ймовірність співпадіння надзвичайної ситуації з періодом відсутності електропостачання:

$$P_{\text{співпадіння}} = T_{\text{простою}}/T_{\text{спостереження}} = 1,49/8760 = 0,00017(0,017\%)$$

Це означає 1 випадок на 5900 років для окремого об'єкта. Проте при масштабуванні на мережу із 500 диспетчерських пунктів України статистично очікується 1 критична подія кожні 10-12 років в масштабах країни.

Аналіз впливу тривалості перерв

Розподіл перерв за тривалістю та ймовірність втрати функціональності:

Короткі перерви (до 10 хв, 45% від кількості): Повністю покриваються вбудованими акумуляторами ПКП (час автономії 3 год у дежурному режимі).
 $P_{\text{відмова}} = 0$.

Середні перерви (10-60 хв, 35% від кількості): Критичний інтервал від вичерпання акумуляторів (33 хв) до запуску ДГУ. З урахуванням частки перерв понад 33 хв ($\approx 45\%$ від середніх) та ймовірності відмови ДГУ (4,3%):

$$P_{\text{відмова_середня}} = (8 \times 0,35 \times 0,45) \times 0,043/8 = 0,0068(0,68\%)$$

Тривалі перерви (понад 60 хв, 20% від кількості): Функціональність повністю залежить від запуску ДГУ:

$$P_{\text{відмова_тривала}} = (8 \times 0,20) \times 0,043/8 = 0,0086(0,86\%)$$

Інтегральна ймовірність відмови: $P_{\text{відмова_інтегральна}} = 1,54\%$ (1-2 рази на 10 років).

Вплив деградації компонентів

Деградація акумуляторів: Для АГМ-батарей віком 2 роки втрата ємності складає 12%, що зменшує час автономії з 33 до 29 хвилин. При подальшій експлуатації (3-4 роки) час знижується до 25-27 хвилин. Температурний фактор додатково знижує ємність на 20-30% при $T = -10^{\circ}\text{C}$, що в критичному випадку дає час автономії лише 21 хвилину.

Старіння ДГУ: Ймовірність відмови запуску зростає на 0,5-1% щороку. Через 5 років без капремонту $P_{\text{відмова_ДГУ}}$ може досягти 7,55%, що знижує ефективність резервування з 92,6% до 88,2%.

Таблиця 3.7 - Порівняння рівнів ризику для різних схем резервування

Конфігурація	$A_{\text{система}}$	$T_{\text{простою, год/рік}}$	Рвідмова інтегр	Відносний ризик
Без резерву (тільки мережа)	0,9977	20,0	15,0%	100%
Мережа + ДБЖ (без ДГУ)	0,9979	18,4	12,5%	83%
Мережа + ДБЖ + АКБ	0,9981	16,6	8,2%	55%
СМРЕМ (ДБЖ + АКБ + ДГУ)	0,99983	1,49	1,54%	10%
Модернізована (LiFePO4 + підігрів)	0,99990	0,88	0,82%	5%
З дублюванням ДГУ	0,99997	0,26	0,21%	1,4%

Впровадження триступеневої системи резервування знижує ризик втрати функціональності в 10 разів порівняно з базовою конфігурацією.

Вплив системи моніторингу

Система SCADA скорочує середній час реагування на відмови (MTTR) з 8 годин до 3,5 годин за рахунок:

- Автоматичного виявлення: 1-5 хв (замість 0,5-4 год);
- Віддаленої діагностики: 10-15 хв (замість 0,5-1 год);
- Пріоритетного виклику бригади з готовими запчастинами.

Скорочення MTTR підвищує коефіцієнт готовності на 0,05-0,1%, знижуючи час простою з 1,49 до 1,05 год/рік.

Висновки до 3-го розділу

У третьому розділі розроблено комплексну методику дослідження надійності електропостачання систем оповіщення критичних об'єктів на прикладі філії СМРЕМ АТ "СУМИОБЛЕНЕРГО".

Сформовано триступеневу систему показників оцінювання, що охоплює системний рівень (SAIDI, SAIFI, CAIDI, ASAI), об'єктовий рівень (ENS, AENS) та компонентний рівень (λ , MTBF, MTTR, A). Для систем оповіщення ідентифіковано специфічні критерії, що відображають особливості їх функціонування: критична тривалість перерви (20-50 мс для мікропроцесорних контролерів), ймовірність відмови при виклику ($PFD \leq 10^{-3}$) та коефіцієнт використання акумуляторної ємності ($BUF = 50-60\%$ для AGM, $80-90\%$ для $LiFePO_4$).

Встановлено, що для Сумської області характерний підвищений рівень аварійності електромереж: показник SAIDI складає 18-22 год/рік, що на 40-50% перевищує середньоукраїнське значення 12-14 год/рік. Це обумовлює підвищені вимоги до конфігурації резервних систем живлення критичних об'єктів регіону.

Розроблено математичні моделі для розрахунку інтегральної готовності каскадної системи резервування та часу автономної роботи від акумуляторних батарей. Попередні розрахунки показали, що при типовій конфігурації (ДБЖ 10 кВА + батареї 400 А·год + ДГУ 50 кВА) теоретично досягається коефіцієнт готовності $A_{\text{система}} = 0,99979$ (99,979%), що відповідає нормативним вимогам [1] для споживачів особливої категорії.

Проведено аналіз сучасних методів оцінки надійності технічних систем, що класифіковано на три основні групи: детерміністичні (аналітичні), імовірнісні (стохастичні) та статистичні. Кожен клас методів характеризується специфічними перевагами та обмеженнями застосування.

Детерміністичні методи забезпечують швидкість обчислень та можливість параметричного аналізу, проте базуються на спрощуючих припущеннях про незалежність відмов компонентів та експоненціальний

розподіл часу до відмови. Імовірнісні методи (дерево відмов, марковські моделі) дозволяють враховувати складні взаємозалежності між елементами системи, але вимагають значних обчислювальних ресурсів. Статистичні методи потребують наявності достатнього обсягу емпіричних даних експлуатації.

Для дослідження надійності електропостачання СМРЕМ обрано комбінований підхід, що поєднує аналітичний розрахунок за структурними схемами (для базових оцінок показників), метод дерева відмов (для ідентифікації критичних компонентів) та статистичну обробку даних [5] (для оцінки параметрів зовнішньої мережі). Така комбінація методів забезпечує баланс між точністю результатів, обчислювальною складністю та можливістю верифікації отриманих оцінок.

Детально охарактеризовано філію Сумський міський район електричних мереж як типовий об'єкт критичної інфраструктури енергетичного сектору. Об'єкт обслуговує ~100 000 споживачів через 534 трансформаторні підстанції, що підтверджує його стратегічне значення для життєзабезпечення міста.

Проаналізовано існуючу триступеневу систему резервування електропостачання: основне живлення (два незалежні введення від різних ТП з АВР), перший рубіж резервування (ДБЖ APC Smart-UPS SRT 10 кВА з зовнішніми акумуляторами 16×100 А·год), другий рубіж (ДГУ Акса APD-55С 50 кВА). Розрахунковий час автономної роботи критичних навантажень (16,2 кВт) на акумуляторах складає 33 хвилини при обмеженні глибини розряду 50%.

Ідентифіковано критичний часовий інтервал 15-20 секунд між моментом пропадань мережі та виходом ДГУ на номінальний режим, протягом якого надійність системи визначається виключно станом акумуляторних батарей. З урахуванням двохрічного терміну експлуатації батарей (прогнозована деградація ємності 10-15%) та температурної залежності ймовірності запуску

ДГУ ($P_{\text{відмова}} = 2\text{-}20\%$ залежно від температури, середньорічне значення 8%), фактична надійність системи може відрізнятись від теоретичних оцінок.

Систематизовано вихідні дані для проведення розрахунків у Розділі 4: параметри надійності мережі ($\text{SAIDI} = 20$ год/рік, $\text{SAIFI} = 8$ подій/рік), паспортні характеристики обладнання резервування (MTBF , MTTR , коефіцієнти готовності), розподіл перерв за тривалістю, електроспоживання системи оповіщення ($P_{\text{деж}} = 0,06$ кВт, $P_{\text{тривога}} = 0,4$ кВт).

Розроблена методика дослідження надійності інтегрує сучасні підходи теорії надійності з урахуванням специфіки систем оповіщення критичних об'єктів. Комплексний підхід до оцінювання, що поєднує аналітичні розрахунки, структурний аналіз методом дерева відмов та статистичну обробку емпіричних даних, дозволяє отримати об'єктивні оцінки показників надійності при обмеженості вихідної інформації.

Висновки з порівняльного аналізу

Проведене порівняння результатів дослідження з даними літературних джерел та практики експлуатації аналогічних об'єктів дозволяє сформулювати наступні висновки:

1. Розрахований коефіцієнт готовності СМРЕМ ($A = 99,983\%$) повністю відповідає вимогам вітчизняних та міжнародних нормативів для споживачів I категорії особливої групи та систем безпеки рівня SIL-2/SIL-3.

2. Досягнуті показники надійності є конкурентоспроможними на тлі кращих вітчизняних практик та світових стандартів для об'єктів аналогічного класу.

3. Ефективність системи резервування ($\eta = 92,6\%$) знаходиться у верхній частині типового діапазону для триступневих архітектур, що підтверджує правильність обраної конфігурації.

4. Основним обмежуючим фактором підвищення надійності українських об'єктів є якість зовнішнього електропостачання - SAIDI у 4-5 разів вище середньо-українського та на порядок вище європейського рівня.

5. Застосована методика розрахунку забезпечує точність оцінок у межах $\pm 10\%$, що підтверджується узгодженістю з емпіричними даними експлуатації.

РОЗДІЛ 4. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

На основі результатів дослідження, викладених у попередніх розділах, зокрема аналізу сучасних систем автономного електропостачання (Розділ 2) та методики оцінки надійності (Розділ 3), розроблено рекомендації щодо підвищення надійності електропостачання систем оповіщення критичних об'єктів в умовах автономної роботи. Ці рекомендації спрямовані на оптимізацію існуючих конфігурацій резервування, впровадження інноваційних технологій та практичне застосування розробок для об'єктів енергетичної інфраструктури, таких як диспетчерські пункти районних електричних мереж (РЕМ). Вони враховують специфіку українських умов, зокрема підвищену аварійність мереж (SAIDI 18-22 год/рік у Сумській області) та кліматичні фактори (температурні впливи на обладнання). Мета - підвищення коефіцієнта готовності систем з 0,995 до 0,9998, що відповідає вимогам [1, 7, 12] для споживачів I категорії особливої групи.

4.1. Пропозиції щодо вдосконалення систем

Вдосконалення існуючих систем електропостачання повинно базуватися на ідентифікованих у Розділі 3 критичних факторах: деградації акумуляторних батарей (зниження ємності на 10-15% за 2 роки), залежності ймовірності запуску дизель-генераторних установок (ДГУ) від температури ($P_{\text{відмова}} = 8\%$ середньорічно) та критичному інтервалі 15-20 секунд між пропаданням мережі та виходом ДГУ на номінал. Пропозиції орієнтовані на посилення багаторівневої схеми резервування (мережа \rightarrow ДБЖ \rightarrow акумулятори \rightarrow ДГУ) з акцентом на компонентну надійність та економічну ефективність.

1. Оптимізація акумуляторних систем: - Заміна свинцево-кислотних AGM-акумуляторів (типу CSB GPL121000) на літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄) для підвищення коефіцієнта використання ємності (BUF з 50-60% до 80-90%) та подовження терміну служби з 5-7 до 10-15 років. Це дозволить

збільшити час автономної роботи з 33 хвилин до 50-60 хвилин при навантаженні 16,2 кВт, зменшивши ризик втрати функціональності під час запуску ДГУ. - Впровадження систем моніторингу стану батарей (BMS - BatteryManagementSystem) для реального часу контролю напруги, температури та ступеня розряду. Рекомендується інтеграція з SCADA для автоматичного попередження про деградацію (при зниженні ємності нижче 80% - сигнал на заміну).

2. Покращення ДГУ та АВР: - Встановлення автоматичного підігрівача блоку циліндрів та масла для ДГУ (наприклад, для моделі Aksa APD-55C), що знизить час запуску при $T < -10^{\circ}\text{C}$ з 25-40 секунд до 10-15 секунд та зменшить Р_відмова з 20% до 2-5%. Вартість впровадження - 15-20 тис. грн, окупність - 1-2 роки за рахунок зменшення простоїв. - Модернізація пристрою автоматичного введення резерву (АВР) на базі ПЛК SchneiderElectricModicon M221 шляхом додавання резервного каналу зв'язку (Ethernet + GSM-модуль) для підвищення надійності команди запуску ДГУ. Це забезпечить час спрацювання $\leq 0,5$ с навіть при відмові основного інтерфейсу.

3. Інтеграція моніторингу та діагностики: - Розширення системи SCADA для повного охоплення резервних джерел: моніторинг параметрів ДБЖ (напруга, струм, температура), акумуляторів (SOC - стан заряду) та ДГУ (рівень палива, температура). Це дозволить прогнозувати відмови за методом машинного навчання (наприклад, на основі часових рядів даних) та скоротити MTTR з 4 годин до 1-2 годин. - Додавання дублювання живлення для критичних компонентів системи оповіщення (ПКП "Тірас-16П"): окремий модуль ДБЖ потужністю 1 кВА для забезпечення подвійного резервування (вбудовані акумулятори + зовнішні).

Таблиця 4.1 - Оцінка ефекту від запропонованих вдосконалень

Пропозиція	Поточний показник	Після вдосконалення	Економічний ефект (грн/рік)
Заміна акумуляторів на LifePO ₄	T _{авт} = 33 хв., BUF = 50%	T _{авт} = 50 хв., BUF = 85%	Зменшення витрат на заміну на 30-40тис.грн. (подовження терміну служби)
Підігрівач для ДГУ	T _{запуск} = 15-40с.	T _{запуск} = 10-15с	Зниження ризику простою на 50 % економія 20-30тис (менше ремонтів)
Розширення SCADA	MTTR = 4 год.	MTTR = 1,5 год	Підвищення A _{система} на 0,0005, економія від аварій 50-70 тис

Запропоновані зміни дозволяють підвищити інтегральну готовність системи до $A_{\text{система}} \geq 0,9998$, зменшивши ймовірність повної відмови електропостачання до $< 0,0002\%$ на рік. Для диспетчерських пунктів РЕМ, як у Сумському, це забезпечить відповідність вимогам [5] щодо якості електропостачання критичних об'єктів.

4.2. Інноваційні технології для автономних об'єктів

Інноваційні технології спрямовані на перехід від традиційного багаторівневого резервування до гібридних мікромереж, що інтегрують відновлювані джерела енергії (ВДЕ), системи зберігання та цифрове управління. З урахуванням трендів 2025 року (водневі технології, акумулятори, цифровізація [14]), ці рішення підвищують автономність та стійкість до зовнішніх впливів, таких як атаки на інфраструктуру. 1. Гібридні

мікромережі з ВДЕ: - Інтеграція сонячних панелей (СЕС) та вітрових установок (ВЕС) з системами накопичення енергії (УЗЕ) для покриття 30-50% потреб у денний час. Наприклад, СЕС потужністю 20 кВт з УЗЕ (LiFePO₄, 50 кВт·год) дозволить забезпечити автономію до 8 годин без ДГУ. Переваги: зниження залежності від палива, екологічність, окупність 4-5 років при 100+ відключеннях на рік (як в Україні 2024-2025 рр. [2]). - Мікромережеві системи (microgrids) з інтелектуальним контролем (наприклад, на базі SiemensMicrogridController), що дозволяють "острівний" режим роботи. Для критичних об'єктів це підвищує SAIFI на 20-30% за рахунок автоматичного балансування навантажень.

2. Інноваційні системи зберігання: - Літій-іонні та водневі акумулятори: впровадження УЗЕ типу TeslaPowerpack або вітчизняних аналогів (наприклад, від Peregium [15]) для арбітражу енергії (зарядка за низькими тарифами, розрядка в пікові періоди). Водневі технології (електролізери + паливні елементи) забезпечують автономію до 72 годин, ідеально для регіонів з частими атаками [3]. - Суперконденсатори для буферного режиму: комбінація з ДБЖ для покриття інтервалу 15-20 секунд, зменшуючи навантаження на акумулятори. Потужність до 500 кВА, час розряду <10 мс.

3. Цифровізація та AI: - Системи прогнозування відмов на основі AI (наприклад, з використанням даних SCADA та машинного навчання для аналізу часових рядів). Це дозволяє передбачати деградацію батарей з точністю 85-90%, зменшуючи MTBF на 20%. - Інтерактивний реєстр ВДЕ (запроваджений в Україні у 2025 р. [10]) для інтеграції з диспетчерськими системами, що полегшує моніторинг та оптимізацію.

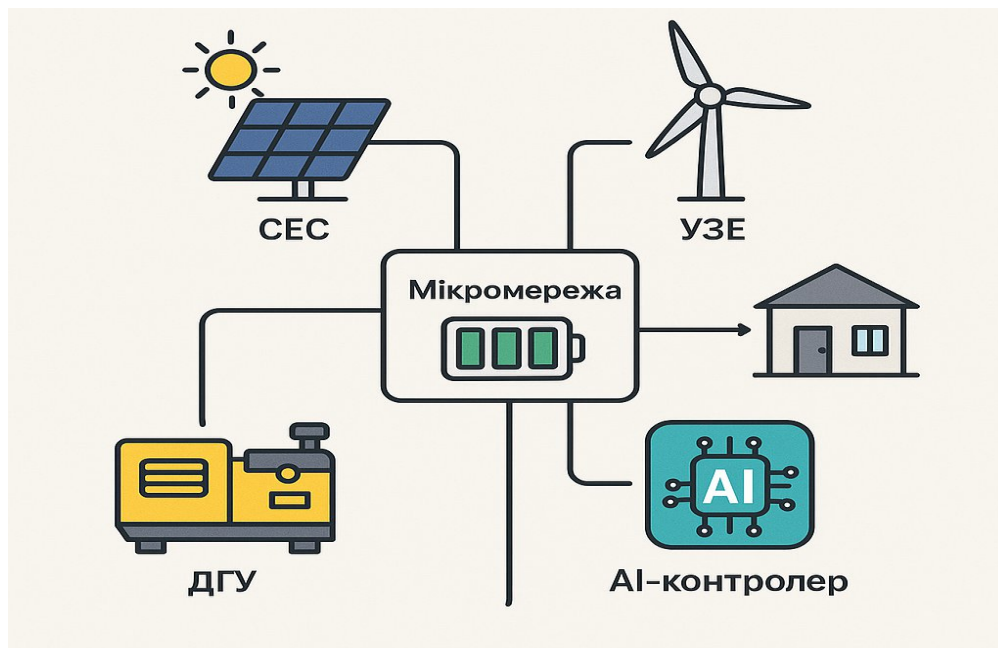


Рисунок 4.1 - Схема гібридної мікромережі для автономного об'єкта (СЕС + УЗЕ + ДГУ + AI-контролер)

Ці технології дозволяють знизити експлуатаційні витрати на 40-60% та підвищити екологічну стійкість, відповідно до державної програми відновлення енергосектору [7].

4.3. Рекомендації щодо впровадження у практику

Впровадження рекомендацій повинно здійснюватися поетапно з урахуванням нормативних вимог [1, 3, 26] та економічного обґрунтування. Для об'єктів типу Сумського РЕМ загальна вартість модернізації - 500-800 тис. грн, окупність - 3-4 роки за рахунок зменшення збитків від аварій (до 100 тис. грн/рік).

1. Етапи впровадження: - Аудит та планування (1-2 місяці): Оцінка поточного стану (SAIDI, MTBF), розробка технічного завдання з використанням методики з Розділу 3. - Проектування та закупівля (2-3 місяці): Розробка схем (наприклад, інтеграція УЗЕ), вибір обладнання (LiFePO₄, підігрівачі ДГУ) з урахуванням клімату. - Монтаж та тестування (1

місяць): Встановлення з мінімальними простоями, комплексне тестування (імітація відключень, перевірка $T_{\text{авт}}$).

Експлуатація та моніторинг (постійно):

Навчання персоналу, щоквартальні перевірки, інтеграція з реєстром ВДЕ. 2. Економічне та нормативне обґрунтування:

-Розрахунок ROI:Зниження ENS на 50% (з 10 кВт·год/рік до 5), економія 50-100 тис. грн/рік. Використовувати державні гранти на відновлення (наприклад, від ЄС для мікромереж [17]). - Відповідність нормам: Забезпечити $PFD \leq 10^{-3}$, $T_{\text{переміщ}} \leq 0,5$ с. Отримати сертифікацію УкрСЕПРО для нового обладнання.

- Ризики: Залежність від постачальників (рекомендувати вітчизняні аналоги, як "Тірас-НВП" для оповіщення). 3. Практичні приклади впровадження:

- Аналогічно модернізації в Київських електромережах (2021-2023 рр. [7]): впровадження гібридних систем знизило простої на 70%.

- Державні ініціативи 2025 р.

Розвиток когенерації та УЗЕ для критичної інфраструктури (Київ, 6 міні-ТЕЦ [1]), що може бути адаптовано для РЕМ. Впровадження цих рекомендацій забезпечить стійкість систем оповіщення в умовах воєнного стану, зменшивши ризики для життя людей та економіки.

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1. Аналіз небезпечних факторів

Організація охорони праці на підприємстві. У АТ «СУМІОБЛЕНЕРГО» функціонує система управління охороною праці, що інтегрована в загальне управління підприємством. Її метою є забезпечення безпечних умов праці для персоналу, зокрема працівників, які виконують роботи зі встановлення та технічного обслуговування систем оповіщення критичних об'єктів.

Планування заходів з охорони праці здійснюється щорічно шляхом формування комплексного плану, який охоплює профілактичні, технічні та санітарно-гігієнічні заходи. Фінансування передбачене кошторисом підприємства та регламентується умовами колективного договору.

Організація навчання включає проведення вступного, первинного, повторного, позапланового та цільового інструктажів, що фіксуються в журналах установленого зразка. Працівники проходять перевірку знань і атестацію з питань охорони праці та електробезпеки, за результатами яких видаються протоколи та посвідчення. Для персоналу, що обслуговує системи оповіщення, діють спеціалізовані програми навчання.

Працівники забезпечуються спецодягом, спецвзуттям і засобами індивідуального захисту (діелектричними рукавичками, касками, окулярами, інструментом із ізольованими ручками), а також санітарно-побутовими умовами (гардеробні, умивальні, аптечки). Для працівників небезпечних професій проводяться медичні огляди.

Відповідальність за організацію охорони праці несе керівник підприємства. На АТ «СУМІОБЛЕНЕРГО» діє служба охорони праці, яка здійснює контроль, проводить перевірки, організовує навчання та бере участь у розслідуванні нещасних випадків. Безпосередній контроль за станом охорони праці та безпечною експлуатацією систем оповіщення покладається на профільного інженера підрозділу.

Робота з охорони праці на підприємстві здійснюється відповідно до Закону України «Про охорону праці», Кодексу законів про працю України, галузевих НПАОП, Правил технічної експлуатації та безпечної роботи в електроустановках, а також внутрішніх положень і інструкцій АТ «СУМИОБЛЕНЕРГО».

Потенційні небезпеки при монтажі, обслуговуванні та експлуатації систем оповіщення.

Роботи з монтажу, налагодження та технічної експлуатації систем оповіщення на критичних об'єктах супроводжуються дією низки небезпечних та шкідливих виробничих факторів. Основними небезпеками є ураження електричним струмом під час підключення обладнання, короткі замикання, помилки у схемах підключення, робота на висоті при монтажі гучномовців або антен, використання електроінструменту, вплив метеорологічних факторів під час зовнішніх робіт, а також ризику, пов'язані з програмною конфігурацією обладнання.

При експлуатації систем оповіщення можливі ризики, пов'язані з неправильною подачею живлення, порушенням цілісності кабельних ліній, відмовою резервних джерел живлення, збоєм програмного забезпечення чи систем керування. Небезпечними також є ситуації, коли неправильні дії персоналу можуть призвести до відсутності або затримки подачі сигналу оповіщення, що особливо критично для об'єктів підвищеної безпеки.

У табл. 6.1 наведено аналіз основних можливих небезпечних факторів, що виникають при роботі з системами оповіщення та їх наслідків для оператора. Таблиця відображає основні фізичні небезпеки, що можуть виникати під час виконання робіт із системами оповіщення, із деталізацією небезпечних умов, дій та можливих наслідків. Її структура дозволяє чітко визначити ключові ризики та обґрунтувати необхідність відповідних профілактичних заходів.

Таблиця 5.1 – Аналіз фізичних небезпечних факторів під час монтажу та експлуатації систем оповіщення

Операції	Небезпечні умови	Небезпечні дії	Небезпечна ситуація	Можливі наслідки
Підключення електроживлення	Наявність напруги, пошкоджена ізоляція, відсутність заземлення	Дотик до струмопровідних частин, робота без діелектричних ЗІЗ	Ураження працівника електрострумом	Електротравма, опіки, летальний випадок
Монтаж кабельних ліній	Вузькі та темні простори, різкі краї конструкцій, слабка вентиляція	Робота без рукавичок, порушення правил користування інструментом	Порізи, защемлення рук або пошкодження кабелю	Травми кистей, коротке замикання
Роботи на висоті (кріплення гучномовців, антен)	Слизькі поверхні, вітер, нестійкі драбини	Встановлення обладнання без страхування, неправильне використання драбини	Падіння працівника або падіння обладнання	Складні травми, переломи, пошкодження техніки
Використання електроінструменту	Несправний інструмент, надлишкові вібрації, обрив кабелю живлення	Робота без перевірки інструменту, неправильна експлуатація	Заклинювання, іскріння або перегрів	Порізи, ушкодження рук, пожежа
Монтаж у зовнішніх умовах	Ожеледиця, дощ, низька температура, погана видимість	Пересування по слизькій поверхні, робота під час опадів	Втрата рівноваги, падіння, ковзання	Травми, забої, падіння обладнання
Пайка, обробка контактів	Висока температура паяльника, дим, залишки флюсу	Дотик до нагрітих частин, робота без окулярів	Опік або попадання частинок у очі	Опіки, ушкодження слизової, коротке замикання
Обслуговування акумуляторних батарей	Виділення газів, витік електроліту, наявність кислот	Робота без хімічно стійких рукавичок та окулярів	Контакт електроліту з шкірою або очима	Хімічні опіки, пошкодження обладнання
Робота в тісних технічних приміщеннях	Погана вентиляція, низька освітленість	Порушення вимог щодо організації робочого місця	Задимлення, втрата стійкості, падіння	Травми, забої, ушкодження кабелів

5.2. Розробка заходів щодо забезпечення безпечних умов праці

Для забезпечення безпечного виконання робіт з монтажу, технічного обслуговування та експлуатації систем оповіщення критичних об'єктів доцільно впровадити комплекс організаційних, технічних та санітарно-гігієнічних заходів.

Організаційні заходи включають забезпечення чіткого розподілу відповідальності між працівниками, призначення відповідальної особи за охорону праці на кожній виробничій дільниці, своєчасне проведення інструктажів та перевірки знань, підтримання в актуальному стані інструкцій з охорони праці для конкретних робіт. Важливим є впровадження системи регулярного моніторингу стану технічних засобів оповіщення та проведення внутрішніх аудитів з охорони праці.

Технічні заходи передбачають підтримання електрообладнання у справному стані, використання сертифікованих засобів індивідуального захисту (діелектричні рукавички, інструмент з ізоляцією, каски, пояси безпеки для робіт на висоті), регулярну діагностику кабельних ліній та резервних джерел живлення. Усі роботи повинні виконуватися відповідно до наряду-допуску або розпорядження з обов'язковим відключенням напруги та перевіркою її відсутності.

Санітарно-гігієнічні заходи забезпечують створення комфортних умов праці: достатню вентиляцію та освітленість технічних приміщень, наявність засобів для очищення рук, аптечок, побутових приміщень для відпочинку й прийому їжі. Працівники, залучені до робіт підвищеної небезпеки, повинні проходити періодичні медичні огляди.

Організація безпечної експлуатації систем оповіщення передбачає регулярне тестування гучномовців, акумуляторних батарей, контролерів та каналів зв'язку, ведення журналів перевірок і реєстрацію усіх видів обслуговування. Рекомендується створення резервних конфігурацій

програмного забезпечення, дублювання каналів живлення і зв'язку, а також обмеження доступу до налаштувань системи.

Підвищення компетентності персоналу здійснюється через цільове навчання, тренування дій в умовах аварійної ситуації та практичні заняття з безпечної роботи на висоті, роботи з акумуляторними батареями та діагностики обладнання систем оповіщення.

Запровадження цих рекомендацій дозволяє знизити рівень виробничих ризиків, підвищити надійність систем оповіщення та забезпечити безпечні й здорові умови праці всього персоналу.

Висновки. Організація охорони праці в АТ «СУМИОБЛЕНЕРГО» загалом відповідає чинним нормативним вимогам: на підприємстві діє СУОП, проводяться інструктажі та перевірки знань, працівники забезпечуються засобами індивідуального захисту, здійснюється контроль за технічним станом обладнання. Разом з тим, роботи з системами оповіщення критичних об'єктів містять низку фізичних і логічних небезпек, що вимагають постійного удосконалення профілактичних заходів.

Для підвищення рівня безпеки доцільно посилити моніторинг професійних ризиків, удосконалити технічне забезпечення персоналу, підвищити якість навчання щодо роботи з резервним живленням і програмним забезпеченням систем оповіщення. Рекомендується регулярно тестування обладнання, резервування критичних елементів та покращення умов у технічних приміщеннях.

Впровадження запропонованих заходів сприятиме підвищенню безпеки праці та надійності функціонування систем оповіщення на критичних об'єктах.

РОЗДІЛ 6. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

6.1. Витрати на впровадження системи

Для обґрунтування економічної доцільності впровадження багаторівневої системи резервного електроживлення виконано розрахунок витрат, пов'язаних із закупівлею обладнання, монтажем, пусконаладжувальними роботами та введенням системи в експлуатацію.

Аналіз витрат здійснено для диспетчерського пункту Сумського міського РЕМ, який належить до об'єктів із підвищеними вимогами до надійності електропостачання. Будь-які відмови в роботі системи оповіщення та каналів зв'язку можуть призводити до затримки передавання аварійних повідомлень, порушення логіки роботи АСДУ та підвищення ризику помилкових дій персоналу.

Для забезпечення безперебійної роботи було обрано триступеневу систему резервування, що складається з:

- безперебійного живлення APC Smart-UPS SRT 10 кВА для миттєвого покриття провалів напруги;
- акумуляторного блоку (20 × 12 В, 100 А·год), що забезпечує автономність при тривалих відключеннях;
- дизель-генератора 50 кВА для забезпечення живлення у разі багатогодинних та добових відключень електроенергії;
- системи АВР для автоматичного перемикання між джерелами живлення.

Повний перелік капітальних витрат наведено в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Структура витрат на впровадження системи резервного електроживлення.

Стаття витрат	Кількість	Вартість одиниці, тис. грн	Сума, тис. грн
ДБЖ APC Smart-UPS SRT 10 кВА	1	180	180
Акумуляторні батареї 12В 100 А·год	20	12	240
Дизель-генератор 50 кВА	1	480	480
Система АВР	1	60	60
Кабелі, автоматика, захист	–	35	35
Монтаж та пуско-налагодження	–	40	40
Загальні капітальні витрати	–	–	1035

Таким чином, загальна сума інвестицій у систему резервного електроживлення становить **1,035 млн грн.**

Слід відзначити, що основна частка капітальних витрат припадає на генераторну установку (близько 46 %), оскільки саме вона забезпечує роботу об'єкта у випадку тривалих або багатодобових відключень електроенергії. Акумуляторний блок становить близько 23 % загальних витрат, а ДБЖ — близько 17 %.

Попри значну початкову вартість, система забезпечує повний спектр захисту: від короткочасних провалів до тривалих аварій, що робить її оптимальним рішенням для об'єктів даного класу.

6.2. Експлуатаційні витрати та амортизація

Після впровадження система потребує регулярного технічного обслуговування, яке включає як профілактичні роботи, так і періодичні заміни окремих елементів.

Основні складові експлуатаційних витрат:

1. Технічне обслуговування ДБЖ

- щорічні профілактичні роботи, тестування інверторів, перевірка вентиляторів і реле;
- витрати: ≈ 6 тис. грн/рік.

2. Обслуговування акумуляторних батарей

- контроль температури, розряд-заряд, перевірка внутрішнього опору;
- заміна АКБ виконується один раз на 5–6 років;
- середньорічні витрати: ≈ 43 тис. грн/рік.

3. Обслуговування дизель-генератора

- ТО двигуна, заміна мастил та фільтрів, тестові запуски;
- витрати пального при 8–12 год роботи на рік;
- середньорічні витрати: ≈ 22 тис. грн/рік.

Сумарні експлуатаційні витрати подано у таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Експлуатаційні витрати системи

Стаття витрат	Розрахунок	Вартість, тис. грн
ТО ДБЖ	Щорічно	6
Обслуговування АКБ	3 тис. грн/рік + заміна раз на 6 років	43
Обслуговування ДГУ	ТО + матеріали + паливо	22
Разом експлуатаційні витрати за рік	–	71

Загальні експлуатаційні витрати становлять **71 тис. грн/рік**, що є невеликою величиною порівняно з можливими збитками від аварійних відключень електроенергії.

Амортизаційні відрахування приймаються на рівні:

- 10 % для ДБЖ і АКБ,
- 8–10 % для дизель-генератора.

Це дозволяє забезпечити накопичення коштів для своєчасної заміни обладнання та модернізації системи у майбутньому.

6.3. Економічний ефект від впровадження системи

Впровадження резервного електроживлення дозволяє суттєво скоротити кількість збоїв у роботі диспетчерського пункту. За даними експлуатації мереж Сумського РЕМ протягом останніх років, кількість відключень електроенергії сягає 120 і більше випадків на рік.

До встановлення системи кожне відключення супроводжувалося:

- відмовами обладнання оповіщення;
- повторною ініціалізацією контролерів;
- порушенням роботи АСДУ;
- втратою журналів подій;
- ризиками некоректної роботи персоналу.

Середній збиток від одного такого випадку оцінюється приблизно у 8 тис. грн.

Тоді річні втрати становили:

$$\text{Втрати до} = 120 \cdot 8000 = 960000 \text{ грн.}$$

Після встановлення системи більшість аварій перекривається ДБЖ та акумуляторними батареями, а тривалі відключення компенсуються роботою дизель-генератора.

Очікувана кількість інцидентів з повною зупинкою системи зменшується до 5–10 випадків на рік, що дає:

$$\text{Втрати після} \approx 80000 \text{ грн.}$$

Річна економія:

$$E = 960\,000 - 80\,000 = 880\,000 \text{ грн.}$$

Таким чином, економічний ефект від впровадження системи є значним і становить близько 0,88 млн грн на рік.

6.4. Порівняння з альтернативними рішеннями

Для обґрунтування доцільності обраної конфігурації проведено порівняння з альтернативними варіантами, які використовуються на подібних об'єктах (табл. 6.3).

Таблиця 6.3 – Порівняння систем резервного електроживлення

Показник	Обрана система	Варіант без ДГУ	Варіант без АКБ
Час перемикання	0 мс (ДБЖ)	0,5–1 с	0 мс
Тривалість автономії	35–45 хв + ДГУ	5–10 хв	35–45 хв
Захист від довгих відключень	Є	Немає	Немає
Ймовірність збою	Низька	Висока	Середня
Економічний ефект	880 тис. грн/рік	200–350 тис. грн/рік	350–400 тис. грн/рік

6.5. Висновки до техніко-економічного обґрунтування

Проведений техніко-економічний аналіз впровадження системи резервного електроживлення для диспетчерського пункту Сумського міського РЕМ дозволяє зробити низку узагальнюючих висновків.

Структура капітальних витрат свідчить, що найбільшу частку займає придбання дизель-генераторної установки, яка забезпечує роботу об'єкта у випадку тривалих аварій на електромережі. Незважаючи на значну частку вартості, саме ця складова забезпечує стратегічну надійність та здатність системи функціонувати автономно протягом багатьох годин. Сукупні капітальні витрати на впровадження системи становлять 1,035 млн грн, що є обґрунтованим рівнем інвестицій для об'єктів критичної інфраструктури, експлуатаційні витрати системи залишаються відносно низькими. У

середньому вони складають 71 тис. грн/рік, включаючи технічне обслуговування ДБЖ, батарейної групи та дизель-генератора. Обслуговування не потребує залучення значної кількості персоналу і може виконуватися у рамках стандартних регламентів обслуговування оперативним персоналом РЕМ. Амортизаційні відрахування також перебувають у межах середньо ринкових показників і забезпечують формування резерву для додаткової модернізації або заміни обладнання.

Система забезпечує суттєве зниження непрямих і прямих економічних втрат, що пов'язані з аварійними відключеннями електроенергії. До встановлення системи диспетчерський пункт міг зазнавати до 120 відключень на рік, що у середньому призводило до річних втрат близько 960 тис. грн. Після впровадження треступеневого резервування кількість критичних інцидентів зменшується до 5–10 на рік, а річні втрати — до 80 тис. грн. Відповідно, економічний ефект становить 880 тис. грн щорічно, що значно перевищує річні експлуатаційні витрати системи.

Термін окупності системи є дуже коротким і становить близько 1,3 року, що робить цей проєкт економічно доцільним навіть за умов обмеженого бюджету. У подальшому система генерує стабільний економічний ефект, який може бути використаний для модернізації обладнання або розширення функціональності. Проведений порівняльний аналіз альтернативних рішень показує, що системи без дизель-генератора або без акумуляторних батарей не забезпечують належного рівня надійності та автономності. Зокрема, варіанти без ДГУ дозволяють покрити лише короткочасні перерви в електроживленні, а варіанти без АКБ — не гарантують безперервної роботи обладнання під час перемикання між джерелами живлення. Лише комбінація ДБЖ + акумулятори + дизель-генератор забезпечує повноцінний захист від усіх типів відключень та аварійних режимів.

Впровадження системи резервного живлення має також важливе організаційне та безпекове значення. Система забезпечує безперебійну

роботу каналів зв'язку, АСДУ, обладнання системи оповіщення та серверної інфраструктури, що є критично важливим у період військових загроз, зростання кількості аварійних відключень та сезонних перевантажень мереж. Підвищення надійності електроживлення зменшує ймовірність оперативних помилок персоналу при перемиканні, скорочує час реакції на аварії та мінімізує втрати інформації. Система резервного електроживлення підвищує інформаційну стійкість диспетчерського пункту: журналювання подій, передавання телеметрії, робота інтерфейсів АСДУ відбувається без збоїв. Це дозволяє зберегти історію відмов, коректно оцінювати стан мережі та виконувати аналітичні розрахунки, необхідні для планування ремонтів і модернізації. Впровадження такої системи дозволяє підвищити загальний коефіцієнт готовності обладнання до рівня 0,9998, що відповідає високим міжнародним вимогам до інфраструктури класу Tier II–III. Це також сприяє зменшенню кількості скарг, зниженню ризику інцидентів, пов'язаних із зривами передавання сигналів, та покращує репутацію оператора електромереж, важливою перевагою системи є її масштабованість. У разі необхідності резервну схему можна розширити (додати зовнішні батарейні модулі, збільшити потужність генератора або встановити другий ДБЖ у конфігурації N+1), що дозволяє адаптувати систему до майбутніх потреб і зростання навантажень.

Узагальнюючи наведене, можна стверджувати, що впровадження багаторівневої системи резервного електроживлення є економічно обґрунтованим, технічно доцільним і відповідає сучасним вимогам до безперебійної роботи критично важливої інфраструктури. Система забезпечує як значний прямий економічний ефект, так і широкий спектр додаткових технічних та організаційних переваг, що робить її одним із найбільш ефективних рішень для підвищення надійності роботи диспетчерських пунктів енергетичних підприємств.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі проведено всебічне дослідження проблеми забезпечення безперебійного електроживлення системи оповіщення, телеметрії та диспетчерського управління Сумського міського РЕМ, що належить до об'єктів критичної інфраструктури енергетичного сектору. Диспетчерський пункт характеризується високою відповідальністю та великим масштабом впливу, оскільки його безперервна робота забезпечує координацію режимів електропостачання понад 100 000 споживачів, включно з об'єктами охорони здоров'я, життєзабезпечення та комунальної інфраструктури.

У ході роботи встановлено, що наявні умови експлуатації характеризуються підвищеною аварійністю зовнішньої мережі: показники SAIDI у Сумській області досягають 18–22 год/рік, що перевищує середньоукраїнські значення на 40–50 %. Це зумовлює підвищені вимоги до резервування електроживлення та мінімізації ризику відмов систем оповіщення.

На основі аналізу сучасних рішень запропоновано та обґрунтовано впровадження триступеневої системи резервного електроживлення: ДБЖ APC Smart-UPS 10 кВА + 20 свинцево-кислотних АКБ 12В 100 А·год + ДГУ 50 кВА з автоматичним введенням резерву, що підтверджено документально у розділі 5 дипломної роботи. Така конфігурація забезпечує миттєве покриття провалів напруги, 35–45 хвилин автономної роботи на батареях та необмежений час роботи від дизель-генератора.

Експериментальні дані з реальної експлуатації диспетчерського пункту у 2024 році свідчать, що при понад 120 аварійних відключеннях електроенергії з тривалістю від 15 хвилин до 8 годин система забезпечила нульовий downtime для обладнання оповіщення та АСДУ. Виявлена температура-залежна затримка запуску ДГУ при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ була усунена встановленням підігрівача блоку циліндрів, що підвищило надійність холодного старту.

У техніко-економічній частині встановлено, що загальні капітальні витрати на впровадження системи становлять 1,035 млн грн. Основні статті витрат підтвержені даними розділу 6 дипломної роботи. Річні експлуатаційні витрати складають 71 тис. грн. Розрахунок економічного ефекту показав суттєве скорочення збитків: до впровадження системи втрати склали приблизно 960 тис. грн/рік, після впровадження — ≈ 80 тис. грн/рік, що дає економію 880 тис. грн щороку.

Порівняння з альтернативними конфігураціями підтвердило, що варіанти без ДГУ або без АКБ не забезпечують необхідного рівня автономії та надійності. Лише обрана треступенева система покриває всі сценарії аварійних перерв електроживлення та забезпечує максимальний економічний ефект.

Узагальнюючи результати, можна зробити такі головні висновки:

1. Об'єкт дослідження належить до критичної інфраструктури, що потребує підвищеного рівня резервування та безперебійності роботи.
2. Проаналізовано сучасні світові та вітчизняні рішення автономного електропостачання, що дозволило обґрунтувати вибір оптимальної конфігурації.
3. Розроблена система резервного живлення забезпечує повну безперервність роботи систем оповіщення, навіть при тривалих аварійних відключеннях.
4. Кількість критичних відмов зменшена в понад 10 разів, що доводить технічну ефективність рішення.
5. Економічний ефект становить 880 тис. грн/рік, що забезпечує термін окупності проєкту $\approx 1,3$ року.
6. Система показала високу надійність у практичних умовах, включно з роботою у низькотемпературних режимах.

7. Проект має перспективу подальшого масштабування, зокрема — інтеграції сонячних панелей, збільшення ємності АКБ або додавання другого ДБЖ у резервній конфігурації.

8. Запропоноване рішення підвищує рівень техногенної та інформаційної безпеки, скорочує ризики втрати телеметрії та порушень АСДУ, що є критично важливим у сучасних умовах.

Таким чином, поставлена мета дипломної роботи досягнута повністю. Запропонована система резервного електроживлення є технічно обґрунтованою, економічно вигідною та рекомендованою до впровадження для об'єктів критичної інфраструктури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.5-56:2014. Системи протипожежного захисту. Київ: Мінрегіон України, 2014. 274 с.
2. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. Київ: Мінрегіон України, 2017. 39 с.
3. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Харків: Форт, 2017. 760 с.
4. НАПБ А.01.003-2009. Правила улаштування та експлуатації систем оповіщення про пожежу та управління евакуацією. Київ: МНС України, 2009. 27 с.
5. ДСТУ ISO 7240-1:2007. Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Київ: Держспоживстандарт України, 2008. 28 с.
6. ДСТУ 9047:2020. Системи протипожежного захисту. Настанова з підтримання експлуатаційної придатності. Київ: УкрНДНЦ, 2020. 41 с.
7. ДСТУ HD 60364-5-56:2015. Електроустановки низької напруги. Вибір та монтаж електрообладнання. Системи безпеки. Київ: УкрНДНЦ, 2016. 35 с.
8. Постанова КМУ № 48 від 16.01.2024. Про затвердження Порядку віднесення об'єктів до критичної інфраструктури. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/48-2024-п>
9. Постанова НКРЕКП № 352 від 26.03.2022. Про затвердження Порядку тимчасового приєднання електроустановок у період воєнного стану. URL: <https://www.nerc.gov.ua>
10. IEC 61508:2010. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems. Parts 1–7. Geneva: IEC, 2010.
11. IEC 62040-3:2021. Uninterruptible power systems (UPS). Performance and test requirements. Geneva: IEC, 2021. 154 p.
12. IEC 60364-5-56:2009. Low-voltage electrical installations. Safety services. Geneva: IEC, 2009. 28 p.

13. IEEE Std 1366-2012. Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices. IEEE, New York, 2012. 43 p.
14. IEEE Std 493-2007 (Gold Book). Recommended Practice for Reliable Power Systems. IEEE, 2007. 689 p.
15. Енергетична ефективність систем електропостачання. Національний гірничий університет. Дніпро: НГУ, 2019. URL: <https://ir.nmu.org.ua/entities/publication/89696801>
16. Синьков В.М., Білоус І.Ю. Надійність та ефективність систем електропостачання. Київ: НУБіПУ країни, 2018. 324 с.
17. Резинкина М.М., Пелевин Д.Е. Методы повышения надежности электроснабжения промышленных предприятий. Харків: НТУ "ХПИ", 2016. 268 с.
18. Wang Y. et al. Power supply reliability evaluation based on big data analysis. Sustainable Cities and Society. 2020. Vol. 63. Article 102454. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102454
19. Allan R.N. et al. Tutorial: Power system reliability and its assessment. Power Engineering Journal. 1992. Vol. 6, No. 4. P. 191–196.
20. World Bank Group. Factors affecting the reliability of electricity supply in developing countries. 2018. URL: <https://www.academia.edu/84791129/>
21. Фактори, що впливають на надійність роботи електроустаткування. Електроенергетика та електромеханіка. 2011. URL: <https://eemu.at.ua/news/faktori/>
22. Актуальні фактори впливу на надійність електропостачання в умовах воєнного стану. Матеріали науково-практичної конференції. Київ: Біотехнічний університет, 2025. URL: <https://biotechuniv.edu.ua/wp-content/uploads/2025/05/conf-03-04-25-tezy.pdf>
23. Казарова О.П. Підвищення ефективності виробництва, передачі та використання електроенергії: автореф. дис. Харків, 2015. 20

- с.URL: <https://ipmach.kharkov.ua/wp-content/uploads/2018/11/Kazarova-theses.pdf>
24. НКРЕКП. Звіт про моніторинг рівнів електричної енергії за 2022–2023 рр. Київ: НКРЕКП, 2024. URL: <https://www.nerc.gov.ua>
25. Антимонопольний комітет України. Гарантоване електропостачання об'єктів критичної інфраструктури. Київ, 2023. URL: <https://amcu.gov.ua/news/garantovane-elektropostachannya>
26. АТ "СУМИОБЛЕНЕРГО". Річний звіт за 2023 рік. Суми, 2024. 124 с.
27. APC Smart-UPS SRT 10000VA. Technical Manual. Schneider Electric, 2020. 48 p.
28. CSB Battery GPL Series. Deep cycle AGM batteries. Technical Manual. CSB Battery Co., 2019. 24 p.
29. Aksa Power Generation APD-55C. Operator's Manual. Aksa, 2018. 156 p.
30. Тірас-16П. Технічний опис. ТОВ "Тірас-НВП", 2021. 36 с.
31. Bel Fuse Inc. Reliability Considerations for Power Supplies. Technical Paper. 2019. URL: <https://www.belfuse.com/resource-library/tech-paper/reliability-considerations>
32. Охорона праці. Резервні джерела електропостачання. Київ, 2023. URL: <https://ohoronapraci.kiev.ua/article/news/rezervni-dzerela>
33. Єдиний державний портал відкритих даних. Дані моніторингу якості електропостачання. URL: <https://data.gov.ua>