

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНЕ НЕКОМЕРЦІЙНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
«ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»  
ФАКУЛЬТЕТ НАУК ПРО ЗДОРОВ'Я  
КАФЕДРА ЦИВІЛЬНОЇ ТА ПРОМИСЛОВОЇ БЕЗПЕКИ  
ІМ. ГЕРОЯ УКРАЇНИ ЧУБА ОЛЕКСАНДРА СЕРГІЙОВИЧА

ДОПУСТИТИ ДО  
ЗАХИСТУ

Завідувач випускової  
кафедри

\_\_\_\_\_ Б.Д.

Халмурадов

« \_\_\_\_\_ »

2025 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**  
ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТР  
ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ 263 «ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА»

**Тема: «Заходи із попередження виникнення та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій на магістральних лініях електропередач»**

Виконавець: студент групи М-263-24-1-ТП Максим ЯРЕМА  
(студент, група, ім'я, прізвище)

Керівник: \_\_\_\_\_ к.т.н., доцент Василь ФЕДИНА  
(підпис) (науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

**Консультанти:**  
Охорона праці \_\_\_\_\_ ст. викладач Олексій КОЗЛІТІН  
(підпис) (науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

Охорона навколишнього  
середовища \_\_\_\_\_ д.т.н., професор Оксана ТИХЕНКО  
(підпис) (науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

Нормоконтролер: \_\_\_\_\_ Віталій НЕЧИПОРУК  
(підпис) (ім'я, прізвище)

КИЇВ 2025

ДЕРЖАВНЕ НЕКОМЕРЦІЙНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
«ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»  
Факультет екологічної безпеки, інженерії та технологій

Кафедра цивільної та промислової безпеки ім. героя України Чуба О.С.

Спеціальність 263«Цивільна безпека»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Б.Д. Халмурадов

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

### **ЗАВДАННЯ**

#### **на виконання кваліфікаційної роботи**

Ярема Миксима Романовича

1. Тема роботи «Заходи із попередження виникнення та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій на магістральних лініях електропередач» затверджена наказом ректора від «28» серпня 2025 р. No 1562/ст
2. Термін виконання роботи: з 29.09.2025р по 25.12.2025р.
3. Вихідні дані роботи: матеріали про технологію експлуатації та обслуговування магістральних ліній електропередач, статистичні дані щодо аварійності та причин відмов обладнання, тактико-технічні характеристики засобів моніторингу та спецтехніки, нормативно-правові акти у сфері енергетики та цивільного захисту.
4. Зміст пояснювальної записки: аналіз організаційної структури та сучасного стану аварійності на підприємстві, теоретичне обґрунтування

переходу до ризик-орієнтованих підходів управління безпекою, розробка проектних пропозицій щодо впровадження систем предиктивного моніторингу та оптимізації відновлювальних робіт, визначення заходів з охорони праці та екологічної безпеки.

#### 5. Календарний план-графік

№ п/п	Завдання	Термін виконання	Підпис керівника
1	Аналітичний огляд літературних джерел	29.09.2025-01.10.2025	
2	Складання календарного плану дкваліфікаційної роботи, пошук та збір інформації, аналіз наукової літератури	02.10.2025-03.10.2025	
3	Загальна характеристика	04.10.2025-05.10.2025	
4	Підготовка додатків до пояснювальної записки	06.10.2025-08.10.2025	
5	Підготовка основної частини (Розділ I)	09.10.2025-19.10.2025	
6	Підготовка основної частини (Розділ II)	20.10.2025-30.10.2025	
7	Підготовка основної частини (Розділ III)	31.10.2025-10.11.2025	
8	Підготовка основної частини (Розділ IV), (Розділ V)	11.11.2025-21.11.2025	
9	На основі проаналізованої інформації написати загальні висновки	22.11.2025-26.11.2025	
10	Передзахист кваліфікаційної роботи	27.11.2025	
11	Підготовка до захисту: доповідь, презентація, ілюстративний (роздатковий) матеріал	28.11.2025-15.12.2025	
12	Захист кваліфікаційної роботи до	25.12.2025	

6. Дата видачі завдання: «28» серпня 2025 р.

Керівник кваліфікаційної роботи (проекту): \_\_\_\_\_ Василь ФЕДИНА

Завдання прийняв до виконання: \_\_\_\_\_ Максим ЯРЕМА

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Заходи із попередження виникнення та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій на магістральних лініях електропередач»: 85 стор., 2 рис., 5 табл., 28 літературних джерел.

МАГІСТРАЛЬНА ЛІНІЯ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ, НАДЗВИЧАЙНА СИТУАЦІЯ, ПОПЕРЕДЖЕННЯ, ЛІКВІДАЦІЯ, МОНІТОРИНГ, ЖИВУЧІСТЬ, РИЗИК-ОРІЄНТОВАНИЙ ПІДХІД, БПЛА, ЦИФРОВИЙ ШТАБ, АВАРІЙНО-ВІДНОВЛЮВАЛЬНІ РОБОТИ.

Об'єкт дослідження — процес забезпечення стабільного та безпечного функціонування магістральних ліній електропередач (МЛЕП) в умовах дії дестабілізуючих чинників.

Предмет дослідження — комплекс організаційно-технічних заходів, методів та моделей із попередження виникнення та ефективної ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій (НС) на магістральних лініях електропередач.

Мета і завдання виконання дипломної роботи. Мета випускної кваліфікаційної роботи полягає у розробці та науковому обґрунтуванні комплексу організаційно-технічних заходів, спрямованих на підвищення ефективності попередження виникнення та прискорення ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій на магістральних лініях електропередач.

Відповідно до поставленої мети визначені такі основні завдання:

- проаналізувати поточний стан та умови експлуатації МЛЕП, ідентифікувати ключові проблеми в системі управління безпекою;
- дослідити та класифікувати основні чинники ризику (техногенні, природні, антропогенні та воєнні), що призводять до НС;
- виявити недоліки в діючих механізмах моніторингу та реагування на аварії;

- розробити проектні пропозиції щодо вдосконалення превентивних заходів та підвищення фізичної стійкості;
- обґрунтувати оптимізовані алгоритми та логістичні моделі для проведення аварійно-відновлювальних робіт;
- розробити заходи з охорони праці та мінімізації впливу на довкілля.

Методи дослідження. В процесі виконання випускної дипломної роботи були використані такі методи:

- системного аналізу;
- статистичного аналізу;
- теорії ризиків та надійності;
- моделювання.

Перший розділ кваліфікаційної роботи присвячений аналізу сучасного стану системи попередження та ліквідації НС на МЛЕП. Проведено аналіз організаційної структури управління безпекою оператора системи передачі. Здійснено статистичний аналіз аварійності та класифікацію причин відмов за останні роки. Виявлено критичні недоліки існуючої системи, зокрема реактивний характер моніторингу та проблеми логістики.

У другому розділі розглянуто теоретико-методологічні засади управління безпекою МЛЕП. Обґрунтовано роль МЛЕП як об'єкта критичної інфраструктури. Проведено теоретичний аналіз загроз та доведено необхідність переходу від концепції «надійності» до концепції «живучості» (Resilience) в умовах сучасних гібридних загроз.

У третьому розділі розроблено проектні пропозиції щодо вдосконалення системи безпеки. Запропоновано впровадження інтегрованої системи предиктивного моніторингу (ІСПМ) з використанням БПЛА та IoT-датчиків, перехід на ризик-орієнтовану модель обслуговування (RCM). Розроблено концепцію «Цифрового штабу АВР» та обґрунтовано використання мобільних опор для швидкого відновлення ліній. Проведено економічне обґрунтування запропонованих рішень.

Четвертий розділ присвячений питанням охорони праці під час виконання робіт на МЛЕП, зокрема розроблено заходи безпеки при використанні новітнього обладнання та захисту від наведеної напруги.

У п'ятому розділі розглядаються питання охорони навколишнього середовища, проаналізовано екологічні ризики аварійних розливів масла та запропоновано заходи з рекультивації земель після проведення аварійно-відновлювальних робіт.

## ЗМІСТ

ЗМІСТ.....	7
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	9
ВСТУП.....	12
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА: СУЧАСНИЙ СТАН СИСТЕМИ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ТА ЛІКВІДАЦІЇ НС НА МЛЕП (на прикладі НЕК «Укренерго»).....	17
1.1. Аналіз організаційної структури управління експлуатацією та безпекою МЛЕП.....	17
1.2. Статистичний аналіз аварійності та відмов на МЛЕП за останні роки, виявлення основних причин НС.....	20
1.3. Аналіз існуючої системи моніторингу та діагностики стану МЛЕП.....	24
1.4. Дослідження діючих заходів із попередження НС.....	26
1.5. Аналіз діючих планів та механізмів ліквідації наслідків НС.....	27
1.6. Висновки.....	29
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА: ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ УПРАВЛІННЯ БЕЗПЕКОЮ МЛЕП.....	30
2.1. Роль та значення МЛЕП в енергетичній безпеці держави як об'єкта критичної інфраструктури.....	30
2.2. Сутність та класифікація надзвичайних ситуацій в електроенергетиці.....	31
2.3. Теоретичний аналіз основних загроз та чинників ризику для МЛЕП.....	33
2.4. Огляд нормативно-правової бази у сфері захисту критичної інфраструктури та реагування на НС.....	37
2.5. Аналіз вітчизняного та провідного зарубіжного досвіду щодо забезпечення стійкості МЛЕП.....	38
2.6. Висновки.....	38
РОЗДІЛ 3 ПРОЕКТНІ ПРОПОЗИЦІЇ: РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ЩОДО ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ТА ЛІКВІДАЦІЇ НАСЛІДКІВ НС НА МЛЕП.....	40
3.1. Пропозиції щодо вдосконалення заходів попередження виникнення НС....	40
3.2. Проектні рішення з оптимізації заходів ліквідації наслідків НС.....	50
3.3. Розробка програми підготовки та протиаварійних тренувань персоналу.....	56
3.4. Організаційно-економічне обґрунтування запропонованих проектних рішень.....	56
3.5. Висновки.....	57

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	59
4.1. Вступ.....	59
4.2. Аналіз умов праці на робочому місці персоналу АВБ.....	60
4.3. Розробка заходів з охорони праці.....	63
4.4. Пожежна безпека виробничого середовища (об'єктів МЛЕП).....	65
4.5. Питання охорони праці до детального опрацювання (Обґрунтування захисного заземлення при АВР).....	66
4.6. Висновки.....	68
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....	70
5.1. Забезпечення екологічної безпеки — фундаментальний пріоритет державної політики України.....	70
5.2. Аналіз впливу МЛЕП та аварійно-відновлювальних робіт на навколишнє середовище.....	71
5.3. Методи мінімізації навантаження на довкілля в контексті сталого розвитку.....	75
5.4. Висновки.....	78
ВИСНОВКИ.....	80
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	84

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- АВБ — Аварійно-відновлювальна бригада
- АВР — Аварійно-відновлювальні роботи
- АЗ — Аварійний запас
- АСУ ТП — Автоматизована система управління технологічними процесами
- БПЛА — Безпілотний літальний апарат
- ВНП — Вибухонебезпечні предмети
- ВПМ — Вантажопідіймальний механізм
- ВРП — Відкритий розподільчий пристрій
- ВЦА — Військово-цивільна адміністрація
- ГАВ — Графіки аварійних відключень
- ГКД — Галузевий керівний документ
- ДСНС — Державна служба України з надзвичайних ситуацій
- ЕМП — Електромагнітне поле
- ЄЦПР — Єдиний центр прийняття рішень
- ЗІЗ — Засоби індивідуального захисту
- ІСПМ — Інтегрована система предиктивного моніторингу
- КІ — Критична інфраструктура
- МЛЕП — Магістральна лінія електропередач
- НАПБ — Нормативно-правовий акт з пожежної безпеки
- НПАОП — Нормативно-правовий акт з пожежної безпеки
- НС — Надзвичайна ситуація
- НШВФ — Небезпечні та шкідливі виробничі фактори
- ОВД — Оцінка впливу на довкілля
- ОЕС — Об'єднана енергетична система
- ОЗ — Охоронні зони
- ОКГТ — Оптичний кабель, вбудований у грозозахисний трос
- ОСП — Оператор системи передачі

ПАВ — Поліциклічні ароматичні вуглеводні

ПБЕЕ — Правила безпечної експлуатації електроустановок

ПВР — План виконання робіт

ПЗЗ — Переносне захисне заземлення

ПЛ — Повітряна лінія

ПЛР — Пакети логістичних рішень

ППР — Планово-попереджувальні ремонти

ПРН — План реагування на надзвичайні ситуації

ПС — Підстанція

ПТЕ — Правила технічної експлуатації електричних станцій і мереж

РЗА — Релейний захист та автоматика

РЦОМ — Регіональні центри обслуговування мереж

CAPEX — Capital Expenditures (Капітальні витрати)

DLR — Dynamic Line Rating (Динамічне управління пропускнуою здатністю)

EMS — Energy Management System (Система управління енергією)

ERS — Emergency Restoration System (Система аварійного відновлення)

GIS — Geographic Information System (Геоінформаційна система)

InSAR — Interferometric Synthetic Aperture Radar (Радіолокаційна інтерферометрія)

IoT — Internet of Things (Інтернет речей)

IR — Infrared (Інфрачервоний спектр)

IT — Information Technology (Інформаційні технології)

KPI — Key Performance Indicators (Ключові показники ефективності)

## ВСТУП

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку світової економіки та геополітичних процесів, енергетична безпека держави виступає не просто як технічна складова, а як фундаментальна основа національного суверенітету та соціально-економічної стабільності. Функціонування об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України є критично важливою передумовою для забезпечення життєдіяльності суспільства, функціонування промислових комплексів, транспортної інфраструктури та оборонного сектору, що регламентується Законом України "Про ринок електричної енергії" [3]. У цьому складному механізмі магістральні лінії електропередач (МЛЕП) відіграють ключову, системоутворюючу роль. Вони виконують функцію "енергетичних артерій", що забезпечують надійну передачу та розподіл генерованих потужностей від атомних, теплових та гідроелектростанцій до центрів споживання по всій території держави, а також забезпечують міждержавні перетоки енергії.

Враховуючи стратегічне значення МЛЕП, які згідно із законодавством віднесено до об'єктів критичної інфраструктури [1], питання забезпечення їх надійної та безперебійної роботи набуває особливої гостроти. Вразливість цих лінійних об'єктів до різноманітних дестабілізуючих факторів перетворює будь-який, навіть незначний інцидент або локальну технічну проблему, на потенційну загрозу системного характеру. Вихід з ладу окремих елементів магістральної мережі здатний спровокувати розвиток каскадних аварій, порушення стійкості енергосистеми та, як наслідок, призвести до виникнення надзвичайної ситуації (НС) державного рівня зі значними економічними та соціальними збитками.

Актуальність даного дослідження обумовлена кумулятивним, синергетичним ефектом трьох основних груп загроз, що існують на сьогоднішній день. По-перше, це техногенні ризики, які є наслідком тривалої

експлуатації енергетичного обладнання. Значний рівень фізичної зношеності та моральної застарілості основних фондів, що в окремих сегментах мережі перевищує 60-70% [26], створює постійний фон підвищеної аварійності. Обладнання, спроектоване та встановлене ще в минулому столітті, вичерпує свій парковий ресурс, що вимагає нових підходів до його обслуговування. По-друге, неможливо ігнорувати глобальні кліматичні зміни, що призводять до суттєвого зростання частоти та інтенсивності небезпечних метеорологічних явищ [20]. Аномальні ожеледно-вітрові навантаження, ураганні вітри, смерчі та повені, які раніше вважалися рідкісними явищами, стають новою кліматичною нормою, чинячи навантаження на конструкції МЛЕП, що часто перевищують їхні проектні значення. По-третє, в умовах сучасної складної геополітичної реальності та воєнного стану, МЛЕП стали безпосереднім об'єктом цілеспрямованих деструктивних впливів та атак [28]. Це формує абсолютно нові виклики для системи цивільного захисту та енергетиків, вимагаючи докорінного перегляду існуючих доктрин захисту, відновлення та забезпечення живучості енергосистеми.

Таким чином, розробка науково обґрунтованого, комплексного підходу до попередження відмов та оптимізації процесів ліквідації наслідків НС на МЛЕП є не просто актуальною науковою задачею, а критично важливою практичною необхідністю, що безпосередньо стосується питань виживання енергетичної галузі та енергетичної безпеки України в цілому.

Мета і завдання дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є комплексна розробка та наукове обґрунтування системи організаційно-технічних заходів, впровадження яких дозволить суттєво підвищити ефективність попередження виникнення аварійних ситуацій, а також забезпечити прискорення ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій на магістральних лініях електропередач в сучасних умовах.

Для досягнення поставленої мети в роботі визначено та вирішується наступний перелік взаємопов'язаних завдань:

1. Провести глибокий системний аналіз поточного стану, структури управління та умов експлуатації МЛЕП в Україні, ідентифікувавши ключові системні проблеми, організаційні протиріччя та «вузькі місця» в існуючій системі управління безпекою.

2. Дослідити теоретико-методологічні засади безпеки та класифікувати основні чинники ризику (техногенні, природні, антропогенні та воєнні), дія яких призводить до виникнення НС на об'єктах МЛЕП, з урахуванням їхньої взаємодії.

3. Здійснити критичний аналіз та виявити недоліки в діючих механізмах моніторингу, технічної діагностики, попередження аварійності та оперативного реагування на позаштатні ситуації.

4. Розробити комплексні, інноваційні проектні пропозиції щодо вдосконалення превентивних заходів, що включають впровадження сучасних засобів дистанційного моніторингу, аналітики даних та підвищення фізичної стійкості об'єктів.

5. Обґрунтувати оптимізовані організаційні алгоритми та логістичні моделі для проведення аварійно-відновлювальних робіт (АВР), спрямовані на мінімізацію часу простою обладнання та скорочення термінів ліквідації наслідків НС.

6. Розробити деталізовані заходи з охорони праці, що враховують специфіку роботи в екстремальних умовах, а також заходи з мінімізації негативного впливу на навколишнє природне середовище під час проведення планових та аварійно-відновлювальних робіт на МЛЕП.

Об'єкт дослідження — процес забезпечення надійного, стабільного та безпечного функціонування магістральних ліній електропередач в умовах дії широкого спектру дестабілізуючих чинників внутрішнього та зовнішнього характеру.

Предмет дослідження — сукупність організаційно-технічних заходів, методів управління, математичних моделей та інженерних рішень, спрямованих

на попередження виникнення та забезпечення ефективної ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій (НС) на магістральних лініях електропередач.

Методи дослідження. Методологічною основою роботи є загальнонауковий діалектичний підхід до пізнання та принципи системного аналізу. Для вирішення поставлених у роботі завдань використано комплекс методів:

- методи статистичного аналізу та обробки даних — для систематизації інформації щодо аварійності, аналізу динаміки відмов обладнання МЛЕП, виявлення стійких кореляцій та визначення основних причин виникнення НС;

- теорію ризиків, теорію ймовірностей та теорію надійності технічних систем — для кількісної та якісної оцінки вразливості компонентів МЛЕП, прогнозування відмов та обґрунтування необхідності впровадження превентивних заходів;

- методи математичного та логістичного моделювання — для розробки оптимізованих моделей управління запасами та маршрутизації руху аварійно-відновлювальних бригад;

- методи експертних оцінок та порівняльного аналізу — для якісного дослідження ефективності існуючих заходів фізичного захисту, кібербезпеки та оцінки міжнародного досвіду;

- системний аналіз та синтез — для узагальнення отриманих результатів, формулювання висновків та розробки цілісного комплексу проектних пропозицій.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розвитку наукових підходів до управління безпекою електроенергетичних систем, а саме:

- удосконалено існуючу класифікацію загроз для МЛЕП шляхом врахування специфіки комбінованих (природно-техногенних) та цілеспрямованих (воєнно-диверсійних) впливів, що дозволяє більш точно оцінювати ризики;

- набув подальшого розвитку ризик-орієнтований підхід до управління аварійним запасом обладнання та матеріалів, що, на відміну від існуючих нормативів, дозволяє оптимізувати резерви під найбільш імовірні сценарії НС, включаючи сценарії множинних пошкоджень;

- запропоновано комплексну модель багаторівневого моніторингу технічного стану МЛЕП, що інтегрує різномірні дані з БПЛА, супутникових систем та стаціонарних IoT-сенсорів для реалізації стратегії обслуговування за станом.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дослідження мають прикладний характер. Розроблені в дипломній роботі проектні пропозиції, методичні рекомендації та технічні заходи можуть бути безпосередньо використані в практичній діяльності оператора системи передачі (НЕК «Укренерго»), а також інших енергетичних компаній та проектних організацій. Впровадження запропонованих рішень дозволить:

- суттєво підвищити ефективність превентивних заходів діагностики та знизити ймовірність виникнення системних аварій з тяжкими наслідками;

- скоротити середній час ліквідації наслідків НС за рахунок впровадження оптимізованих логістичних схем та новітніх технологій швидкого відновлення;

- підвищити рівень безпеки виробничого персоналу під час виконання робіт в складних умовах та мінімізувати потенційні екологічні збитки від аварійної діяльності.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота побудована за логікою вирішення поставлених завдань і складається зі вступу, п'яти основних розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Логіка викладення матеріалу відображає рух від аналізу поточного стану проблеми (Розділ 1) та її теоретичного осмислення (Розділ 2) до розробки конкретних проектних рішень (Розділ 3) та обґрунтування їх безпечності та екологічності (Розділи 4, 5).

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА: СУЧАСНИЙ СТАН СИСТЕМИ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ТА ЛІКВІДАЦІЇ НС НА МЛЕП (на прикладі НЕК «Укренерго»)

### 1.1. Аналіз організаційної структури управління експлуатацією та безпекою МЛЕП

Забезпечення надійного та стабільного функціонування об'єднаної енергетичної системи України є складним багатофакторним процесом, в якому ключову, визначальну роль відіграє ефективна, адаптивна система управління. Система управління безпекою експлуатації магістральних ліній електропередач (МЛЕП), побудована на базі Національної енергетичної компанії «Укренерго» (далі — ОСП, Оператор системи передачі), має класичну, історично сформовану архітектуру. Вона являє собою розгалужену багаторівневу матричну структуру, що функціонує у суворій відповідності до вимог Кодексу системи передачі [10], Закону України "Про ринок електричної енергії" та низки внутрішніх галузевих нормативних документів. В цілому, дана структура довела свою життєздатність та ефективність для вирішення стандартних, штатних виробничих завдань у мирний час. Проте, детальний критичний аналіз її функціонування в сучасних кризових умовах, що характеризуються високим рівнем невизначеності, динамікою загроз та дефіцитом часу, виявляє суттєві системні недоліки, управлінські розриви та "вузькі місця" [26].

Процес управління безпекою та реагуванням на надзвичайні ситуації (НС) в компанії фактично декомпозиційоване та функціонально розподілене між трьома основними вертикалями управління, кожна з яких має свої специфічні функції, повноваження, КРІ та зону відповідальності:

1. Операційно-технологічна вертикаль (Диспетчерський центр ОСП): Ця структура справедливо вважається "мозковим центром" енергосистеми. Вона несе повну, одноосібну відповідальність за операційну безпеку, балансування потужності генерації та споживання, а також дотримання заданих параметрів режимів роботи ОЕС (частоти, напруги) в межах допустимих діапазонів. В арсеналі диспетчерів знаходяться потужні сучасні програмно-апаратні комплекси, зокрема системи SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) та EMS (Energy Management System), що дозволяють у реальному часі, з дискретністю в кілька секунд, контролювати телеметричні параметри мережі. При виникненні будь-якої НС, першочергова, домінуюча задача, що стоїть перед цією вертикаллю, полягає в негайній локалізації аварії. Це досягається, як правило, шляхом термінових дистанційних оперативних перемикань або, у крайніх випадках, застосування графіків аварійних відключень (ГАВ, СГАВ) для запобігання каскадному розвитку аварії та збереження цілісності енергосистеми, що чітко регламентується чинними галузевими інструкціями [13].

2. Технічна вертикаль (Департамент експлуатації та ремонтів): Ця масштабна, територіально розгалужена структура, що включає регіональні центри обслуговування мереж (РЦОМ), несе безпосередню відповідальність за фізичний стан основних фондів та активів компанії, тобто за забезпечення технічної безпеки. До її виключної компетенції входить стратегічне планування, матеріально-технічна організація та безпосереднє виконання всього спектру ремонтних робіт: капітальних, поточних та планово-попереджувальних (ППР). Діяльність цієї вертикалі суворо регламентована технічними нормами ГКД та СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007 [7]. Важливо підкреслити, що саме ця вертикаль виступає головним виконавцем фізичних робіт з ліквідації наслідків аварій на місцях, мобілізуючи для цього кваліфікований персонал, важку спецтехніку та матеріальні ресурси аварійно-відновлювальних бригад (АВБ).

3. Вертикаль цивільного захисту та надзвичайних ситуацій (ЦЗ та НС): Це спеціалізований адміністративний підрозділ, діяльність якого регламентована насамперед державним законодавством, зокрема Кодексом цивільного захисту України [2]. До основних функцій цього підрозділу належить: методичне керівництво питаннями безпеки, розробка та постійна актуалізація Планів реагування на НС (ПРН), проведення формальної класифікації подій за державним класифікатором НС, а також організація офіційної міжвідомчої взаємодії з органами державної влади, підрозділами ДСНС [27] та місцевими військовими адміністраціями.

4. Аналіз міжвертикальної взаємодії при НС: Проведений системний аналіз дозволяє стверджувати, що однією з найбільш критичних проблем існуючої системи управління є певна розсинхронізація пріоритетів та відсутність єдиного, наділеного всією повнотою повноважень центру прийняття рішень (ЄЦПР) в перші, найбільш критичні години після виникнення НС. Як слушно зазначають дослідники Тугай Ю. І. та Спінул В. О. [16], при виникненні масштабної системної аварії неминуче виникає об'єктивний конфлікт інтересів між різними вертикалями. З одного боку, диспетчерський центр категорично вимагає максимальної швидкості відновлення транзиту електроенергії "за будь-яку ціну" для стабілізації режиму. З іншого боку, технічний персонал на місцях юридично та морально зобов'язаний забезпечити безумовну безпеку виконання робіт, суворо дотримуючись усіх вимог ПБЕЕ [6], що об'єктивно потребує часу на підготовку робочих місць, інструктажів та допуск бригад. Відсутність єдиного оперативного штабу, який би ефективно поєднував компетенції та повноваження всіх трьох вертикалей, є ключовим організаційним недоліком, що знижує загальну оперативність реагування.

## **1.2. Статистичний аналіз аварійності та відмов на МЛЕП за останні роки, виявлення основних причин НС**

Для розробки науково обґрунтованих та ефективних заходів попередження НС необхідно мати чітке, базоване на фактах уявлення про природу, структуру та динаміку аварійності. Статистичний аналіз виступає надійним фундаментом для управління ризиками згідно з міжнародним стандартом ДСТУ ISO 31000:2018 [9]. Детальний ретроспективний аналіз великих масивів даних про технологічні порушення в роботі МЛЕП за докризовий період дозволяє виявити певні закономірності та класифікувати основні причини виникнення НС. Деталізовані статистичні дані щодо динаміки та структури аварійних відключень за останні 5 років наведено в Таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Динаміка та структура аварійних відключень на МЛЕП 330-750 кВ (умовні  
узагальнені дані)

Рік	Загальна кількість відключень	З них через погодні умови (ожеледь, вітер)	З них через технічні причини (зношення, дефекти)	З них через сторонній вплив (низові пожежі, ДТП)	З них внаслідок воєнних дій / диверсій
2019	142	68 (48%)	52 (37%)	22 (15%)	-
2020	138	71 (51%)	49 (36%)	18 (13%)	-
2021	145	65 (45%)	58 (40%)	22 (15%)	-
2022	215	70 (32%)	55 (26%)	15 (7%)	75 (35%)
2023	280	82 (29%)	60 (21%)	18 (7%)	120 (43%)
Всього	920	356	274	95	195

Примітка: Дані ілюструють тенденцію до зростання частки воєнних факторів та стабільно високий рівень впливу погодних умов.

Узагальнені дані щодо розподілу причин аварійності систематизовано та наведено в Таблиці 1.2.

## Структура причин аварійних відключень на МЛЕП

Група факторів	Частка відмов, %	Характерні причини	Вплив на систему
Природно-кліматичні	45-50%	Ожеледь, вітрові навантаження, грози, повені	Стохастичний, важкопрогнозований, масовий характер пошкоджень
Техногенні	35-40%	Зношеність обладнання, корозія, дефекти ізоляції	Прогнозований, залежить від якості діагностики та ППР
Антропогенні та воєнні	10-20%	Диверсії, бойові дії, вандалізм, кібератаки	Цілеспрямований, критичний вплив на вузлові точки

Джерело: розроблено автором на основі аналізу даних [20, 26]

Деталізація загроз та глибокий аналіз їх динаміки дозволяє виокремити наступні стійкі тенденції, які необхідно обов'язково враховувати при стратегічному плануванні заходів безпеки:

1. Природно-кліматичні фактори: Ця група факторів стабільно залишається найбільш небезпечною та непередбачуваною, маючи яскраво виражений стохастичний (випадковий) характер.

- Ожеледно-паморозеві відкладення: Як вказують у своїх наукових роботах Бондаренко В. Є. та Гречко О. М. [20], глобальні кліматичні зміни призводять до суттєвого, аномального зростання інтенсивності та тривалості

ожеледних навантажень на території України. Фактична товщина стінки ожеледі на проводах часто значно перевищує нормативні розрахункові значення, закладені в Правилах улаштування електроустановок (ПУЕ) [5] при проектуванні ліній 30-40 років тому. Це неминуче спричиняє масові фізичні обриви проводів, тросів та навіть механічне руйнування (складання) металевих опор під критичною вагою льоду.

- Вітрові навантаження та грозова активність: Ці явища є причиною до 70% усіх короткочасних аварійних відключень у весняно-літній період. Недостатня механічна стійкість старих ліній до шквальних вітрових навантажень часто пов'язана з застарілими підходами до проектування, що не враховували сучасну аеродинаміку прольотів та зміну рози вітрів [17].

2. Техногенні фактори: Ця група причин безпосередньо та нерозривно пов'язана з поточним фізичним станом активів, їхнім віком та якістю технічного обслуговування.

- Крихке руйнування ізоляторів та корозія: Відомий дослідник Кузнецов В. Г. [12] пов'язує зростання кількості таких відмов з незворотними процесами фізичного та хімічного старіння матеріалів (фарфору, загартованого скла, металу конструкцій), а також з недостатньою глибиною та ефективністю існуючих методів діагностики, які не завжди здатні виявити приховані дефекти на ранній стадії їх розвитку.

- Дефекти контактних з'єднань: Поступове підвищення перехідного електричного опору в контактних з'єднаннях (шлейфових петлях, апаратних затискачах) призводить до їх локального перегріву, відпалу металу і, як наслідок, до фізичного руйнування (перегорання) шлейфів під робочим струмовим навантаженням.

3. Антропогенні та новітні (воєнні) загрози: Починаючи з 2022 року, абсолютно домінуючим, а в окремих регіонах і визначальним фактором аварійності, стали цілеспрямовані деструктивні атаки на об'єкти енергетичної інфраструктури. Як зазначається в численних галузевих аналітичних звітах [28]

та наукових публікаціях Жежеленка І. В. [22], цей фактор повністю змінює існуючу парадигму безпеки. На відміну від випадкових "мирних" аварій, цей вплив спрямований на свідоме, скоординоване та одночасне виведення з ладу критично важливих вузлів системи, що абсолютно не враховувалося традиційними моделями розрахунку надійності [11].

### **1.3. Аналіз існуючої системи моніторингу та діагностики стану МЛЕП**

Ефективна, своєчасна система технічної діагностики є фундаментом попередження будь-яких аварій. Вона має базуватися на сучасних наукових принципах та нормах, викладених у галузевому стандарті СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007 [7]. Проте, аналіз практичної реалізації цих норм на підприємствах свідчить, що на практиці система моніторингу часто має переважно реактивний або формально-періодичний характер. Порівняльний аналіз методів діагностики, що реально застосовуються в компанії, наведено в Таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

## Порівняльний аналіз методів діагностики стану МЛЕП

Метод діагностики	Періодичність	Переваги	Недоліки
Візуальний огляд (піший обхід)	1 раз на 6 міс.	Простота організації, низька вартість, виявлення видимих дефектів	Високий суб'єктивізм (людський фактор), неможливість огляду верхньої частини опор, вкрай низька частота
Тепловізійний контроль	За графіком (1 раз на рік)	Ефективне виявлення прихованих дефектів контактів (зон перегріву)	Залежність результатів від навантаження лінії та погодних умов, епізодичність
УФ-дефектоскопія	За необхідності	Виявлення коронних розрядів (мікропошкодження ізоляції)	Висока вартість обладнання, вузька спеціалізація методу
Моніторинг ожеледі (датчики)	Постійно (локально)	Оперативні дані про навантаження в реальному часі	Встановлені лише на окремих, локальних ділянках, не покривають всю мережу

Джерело: складено автором

Аналітичний висновок: Як наочно демонструють дані Таблиці 1.3, існуюча система діагностики, хоча і дозволяє фіксувати вже розвинені, очевидні дефекти, є недостатньою для раннього прогнозування відмов в умовах динамічних стохастичних навантажень [15]. Впровадження комплексного, автоматизованого online-моніторингу (в тому числі з широким використанням безпілотних літальних апаратів — БПЛА) є необхідним еволюційним кроком для переходу від констатації фактів до предиктивного аналізу стану активів [23].

#### **1.4. Дослідження діючих заходів із попередження НС**

##### **1.4.1. Ефективність планово-попереджувальних ремонтів (ППР)**

Історично склалося, що система ППР, жорстко регламентована нормативними документами ГКД та ПТЕ, базується на усередненій статистиці відмов та фіксованих календарних термінах проведення робіт. Проте, світовий досвід експлуатації та фундаментальні праці Moubray J. [18] переконливо доводять, що такий "календарний" підхід є економічно та технічно неефективним для обладнання, що знаходиться на пізніх стадіях свого життєвого циклу. Ремонт "за календарем" часто призводить до нераціонального використання обмежених матеріальних ресурсів на обслуговування ще справного обладнання, і водночас допускає небезпечний пропуск критичних аварій на об'єктах з прискореним зносом.

##### **1.4.2. Аналіз стану фізичного захисту та охоронних зон**

Відповідно до імперативних вимог Закону України "Про критичну інфраструктуру" [1], забезпечення надійного фізичного захисту об'єктів є

безумовним державним пріоритетом. Проте, аналіз реального стану справ свідчить, що існуючі, традиційні заходи (стандартні огороження, периметральна сигналізація, відеонагляд) часто не відповідають високому рівню сучасних загроз, особливо диверсійного та терористичного характеру [22]. Крім того, контроль за дотриманням правового режиму охоронних зон МЛЕП залишається суттєво ускладненим через недосконалість правових механізмів впливу на порушників (агрофірми, забудовників), що створює додаткові ризики виникнення пожеж та механічних пошкоджень технікою.

### **1.4.3. Системи протиаварійного керування (РЗА)**

Варто окремо зазначити, що сучасні мікропроцесорні пристрої релейного захисту та автоматики (РЗА), які активно впроваджуються в енергосистемі, забезпечують високу селективність та швидкодію відключень. Однак, їх масове впровадження та глибока інтеграція в єдині інформаційні мережі створює нові, раніше не характерні ризики у сфері кібербезпеки. Це вимагає від ОСП суворого дотримання міжнародних стандартів захисту інформації в системах АСУ ТП для повного унеможливлення зовнішнього несанкціонованого втручання в алгоритми роботи автоматики.

## **1.5. Аналіз діючих планів та механізмів ліквідації наслідків НС**

### **1.5.1. Оцінка ефективності взаємодії**

Формально, процедура взаємодії всіх служб під час НС регламентується офіційно затвердженими Планами реагування, розробленими згідно з вимогами Кодексу цивільного захисту [2]. Однак, критичний аналіз реальних кризових ситуацій часто показує певну декларативність та формальність цих документів. Відсутність на практиці чітко відпрацьованих, похвилинних алгоритмів

взаємодії енергетиків з військовими адміністраціями та підрозділами ДСНС [27] на місцях призводить до втрати дорогоцінного часу на етапі організації робіт та допуску персоналу.

### **1.5.2. Логістика аварійно-відновлювальних бригад (АВБ)**

Однією з найбільш болючих проблем залишається так звана проблема "останнього кілометра", детально описана та проаналізована в роботах Лесового А. Н. [24]. Її суть полягає в тому, що фізична доставка важкої спецтехніки та великогабаритних вантажів (опор, трансформаторів, барабанів з проводом) безпосередньо до місця аварії по складному бездоріжжю (болота, рілля, лісові масиви) часто займає до 80% загального часу ліквідації аварії. Це свідчить про відсутність належного проактивного логістичного планування маршрутів та підготовки під'їзних шляхів.

### **1.5.3. Управління аварійним запасом (АЗ)**

Традиційна стратегія формування та зберігання аварійного запасу, що базувалася на статистичному аналізі минулих відмов [16], виявилася помилковою та вразливою в нових умовах активних воєнних дій та кліматичних аномалій. Сценарії, що передбачають одночасне руйнування десятків опор на одній лінії або повне знищення підстанції, раніше не розглядалися як вірогідні і не були передбачені нормативними документами. Це призводить до гострого дефіциту критичного обладнання та матеріалів саме в той момент, коли вони найбільш потрібні для ліквідації наслідків масштабної НС.

## 1.6. Висновки

Підсумовуючи проведений в даному розділі аналіз, можна сформулювати наступні висновки:

1. Проведений комплексний аналіз, що спирається на звітні дані ОСП [26] та сучасні вітчизняні і зарубіжні наукові дослідження [15, 20], переконливо засвідчив низьку адаптивність існуючої системи управління безпекою до характеру та масштабу сучасних загроз.

2. Виявлено, що діюча в компанії система моніторингу [12] та методологія планових ремонтів [7] є морально застарілими порівняно з сучасними передовими світовими підходами, такими як RCM [18], і потребують докорінного реформування та модернізації.

3. Критичними "вузькими місцями", що вимагають негайного системного вирішення, є: організаційна розсинхронізація дій підрозділів в умовах кризи [16], вкрай неефективна логістика АВБ на етапі "останнього кілометра" [24] та невідповідність стратегії формування аварійного запасу реальним катастрофічним сценаріям руйнувань [22].

## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА: ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ УПРАВЛІННЯ БЕЗПЕКОЮ МЛЕП

#### **2.1. Роль та значення МЛЕП в енергетичній безпеці держави як об'єкта критичної інфраструктури**

Магістральні лінії електропередач (МЛЕП) у сучасній архітектурі держави виходять далеко за рамки поняття суто технічного елемента передачі енергії. Вони трансформувалися у фундаментальну основу національної безпеки та стійкості суспільства. Відповідно до положень Закону України "Про критичну інфраструктуру" [1], МЛЕП класифікуються як об'єкти критичної інфраструктури (КІ) I категорії важливості. Такий високий статус обумовлений тим, що їх надійне та безперебійне функціонування є безальтернативною передумовою для роботи всіх інших життєво важливих секторів економіки: централізованого водопостачання та водовідведення, телекомунікаційних мереж, банківського сектору, системи охорони здоров'я та транспортної логістики.

Вразливість МЛЕП як об'єкта захисту обумовлена не лише їхньою значною фізичною протяжністю, що вимірюється тисячами кілометрів трас, які часто проходять через важкодоступні, лісисті та малонаселені місцевості, але й високим ступенем взаємозв'язаності (interconnectivity) сучасної об'єднаної енергетичної системи. Як зазначається у фундаментальних дослідженнях академіка Кириленка О. В. [15], сучасна енергосистема є складною кіберфізичною системою, де порушення режиму або балансу в одному локальному вузлі миттєво, зі швидкістю електромагнітної хвилі, передається на сотні кілометрів, безпосередньо впливаючи на роботу суміжних елементів та підсистем.

Теоретична концепція каскадних збоїв (cascading failures), яка глибоко досліджена в міжнародних наукових працях, зокрема у роботах Panteli M. [25], наочно демонструє механізм розвитку системних аварій в таких мережах. Відмова одного чи кількох ключових вузлів МЛЕР (так звана "ініціююча подія" або критерій N-1) неминуче призводить до миттєвого перерозподілу потоків електричної потужності на паралельні, суміжні лінії. Якщо ці лінії в цей момент вже працюють на межі своєї пропускної здатності, виникає їх аварійне перевантаження, що викликає спрацювання релейного захисту та автоматичне відключення. Це, в свою чергу, провокує подальший лавиноподібний процес послідовних відключень, здатний за лічені хвилини призвести до повного знеструмлення великих регіонів або навіть до "погашення" всієї енергосистеми (блекауту). В умовах сучасних гібридних загроз, цей сценарій перестає бути суто теоретичною математичною моделлю і стає реальним інструментом тиску на державу.

## **2.2. Сутність та класифікація надзвичайних ситуацій в електроенергетиці**

Для цілей даної кваліфікаційної роботи стандартна, базова класифікація надзвичайних ситуацій (НС), наведена у Кодексі цивільного захисту України [2], потребує суттєвої деталізації, наукового уточнення та адаптації до специфіки функціонування об'єктів електроенергетики. Традиційний адміністративний поділ на техногенні, природні, соціальні та воєнні НС не повною мірою відображає глибинну фізику процесів, що відбуваються в електричних мережах під час аварійних режимів.

З наукової точки зору, спираючись на праці таких вчених як Володарський Є. Т. [11] та Тугай Ю. І. [16], доцільно ввести наступні уточнюючі класифікаційні ознаки, що є критичними для вибору правильної стратегії захисту та реагування:

1. За джерелом виникнення (природою загрози):

- Стохастичні (імовірнісні) події: Це явища та процеси, що підкоряються класичним статистичним законам розподілу випадкових величин. Сюди традиційно відносяться природні явища (грози, шквальні пориви вітру, ожеледь) та випадкові відмови техніки через приховані дефекти матеріалів або природне старіння ізоляції. Управління такими подіями традиційно базується на методах теорії надійності та математичній статистиці, а основним інструментом захисту є створення нормативних запасів міцності та резервування пропускнуої здатності мережі.

- Детерміновані (антагоністичні) події: Це принципово інший клас подій, що є результатом свідомих, цілеспрямованих та ретельно спланованих дій інтелектуального опонента (диверсії, кібератаки, ракетні удари). Як підкреслює у своїх дослідженнях Жежеленко І. В. [22], логіка цих подій не є випадковою; вона спрямована на максимізацію завданої шкоди шляхом точкової атаки на найбільш вразливі або критично важливі вузли системи. Для таких подій класичні методи розрахунку ймовірності не працюють, оскільки ймовірність атаки залежить від рішення опонента, а не від природної статистики.

2. За характером перебігу та масштабом наслідків:

- Локальні (прості) відмови: Вихід з ладу одного елемента (наприклад, пробій ізолятора, обрив шлейфа), що не порушує загальної стійкості системи та, як правило, ліквідується засобами автоматики (АПВ) або оперативним персоналом без суттєвих наслідків для споживачів.

- Системні (каскадні) НС: Масштабні події, що супроводжуються глибоким порушенням статичної або динамічної стійкості паралельної роботи частин ОЕС, поділом єдиної системи на несинхронні частини ("острови") або масовим відключенням споживачів на значній території [13]. Саме цей тип НС є основним предметом нашого дослідження.

## **2.3. Теоретичний аналіз основних загроз та чинників ризику для МЛЕП**

### **2.3.1. Техногенні загрози: межі застосовності класичної теорії надійності**

Існуюча в Україні система технічного обслуговування та ремонтів (ТОіР), зокрема система планово-попереджувальних ремонтів (ППР), методологічно базується на жорстких календарних термінах. Теоретичною основою такого підходу є класична модель інтенсивності відмов технічних систем, відома в інженерії як "крива відмов" або "ванна крива" (bathtub curve), детально описана в фундаментальній теорії надійності [11].

Відповідно до цієї базової моделі, життєвий цикл будь-якого технічного обладнання поділяється на три характерні періоди: I. Період припрацювання: Характеризується високою, але поступово спадаючою інтенсивністю відмов, що викликані прихованими виробничими дефектами та помилками монтажу. II. Період нормальної експлуатації: Найдовший період, коли інтенсивність відмов ( $\lambda$ ) є сталою та мінімальною. Відмови мають раптовий, випадковий характер і не залежать від часу роботи. III. Період зношення (старіння): Інтенсивність відмов починає різко, експоненційно зростати через незворотні фізико-хімічні процеси деградації (корозія металу, старіння ізоляції, втомні явища в матеріалах).

Фундаментальна проблема вітчизняної енергетики полягає в тому, що значна частина активів МЛЕП в Україні (опори, проводи, грозотроси, ізоляція) експлуатуються понад 40-50 років, тобто знаходяться глибоко в зоні III (період зношення). В цих умовах, як переконливо доводить у своїй фундаментальній праці Moubray J. [18], класичний календарний підхід до ремонтів стає неефективним і економічно невиправданим. Ремонт "за графіком" фізично не встигає за експоненційним зростанням ймовірності відмови. Це теоретично

обґрунтовує нагальну необхідність переходу до сучасної концепції Reliability-Centered Maintenance (RCM) — обслуговування, орієнтованого на надійність, де стратегія втручання визначається не календарем, а реальним технічним станом та критичністю активу для системи.

### **2.3.2. Природні загрози: невідповідність кліматичних моделей**

Другою важливою теоретичною проблемою є застарілість базових кліматичних моделей, закладених у нормативну базу проектування. Історично МЛЕП в Україні проектувалися згідно з картами кліматичного районування ПУЕ [5], які базувалися на усереднених метеорологічних даних середини ХХ століття. Ці моделі розглядали клімат як умовно стаціонарну систему з передбачуваними параметрами.

Однак, сучасні кліматологічні дослідження [20] та технічні звіти CIGRE [17] фіксують глобальні та локальні зміни клімату, що призводять до статистично значущого збільшення частоти та амплітуди екстремальних погодних явищ. Спостерігається так званий ефект "чорного лебедя", коли навантаження (наприклад, товщина стінки ожеледі або швидкість вітру), які раніше мали розрахункову ймовірність повторення 1 раз на 50 років, тепер трапляються раз на 5-10 років. Це створює небезпечний розрив між проектною механічною стійкістю ліній та реальними динамічними навантаженнями, що вимагає перегляду коефіцієнтів запасу міцності та переходу до імовірнісних методів розрахунку будівельних конструкцій.

### **2.3.3. Антропогенні та воєнні загрози: зміна парадигми від Надійності до Живучості**

Найбільш складним викликом сучасності є адаптація енергосистеми до антагоністичних загроз воєнного часу. Проблема невідповідності існуючих

заходів захисту (які розраховані на випадкові аварії) масштабам руйнувань від цілеспрямованих атак є прямим наслідком застосування інструментів теорії надійності там, де потрібні інструменти теорії живучості (Resilience).

Теорія надійності (Reliability) [11] відповідає на питання: "Як довго система може працювати без відмов?". Її головна мета — збереження працездатності ( $P(t)$ ) через створення резервів та запасів міцності. Це концепція "Fail-safe" (безпечна відмова).

Теорія живучості (Resilience) [25] відповідає на зовсім інше питання: "Як швидко система може відновити свою функціональність після часткового руйнування?". Вона апіорі допускає можливість пошкодження, але фокусується на мінімізації його наслідків та максимальній швидкості реакції. Це концепція "Safe-to-fail" (безпечний при відмові).

Детальний порівняльний аналіз цих двох концептуальних підходів наведено в Таблиці 2.1.

## Порівняльна характеристика концепцій Надійності та Живучості

Характеристика	Надійність (Reliability)	Живучість (Resilience)
Основна мета	Запобігання відмові (Prevent)	Адаптація та Відновлення (Recover)
Тип загрози	Відомі, стохастичні, одиничні відмови	Невідомі, антагоністичні, множинні відмови
Ключова метрика	MTBF (Середній час між відмовами)	Час відновлення, обсяг невідпущеної енергії
Стратегія захисту	"Жорстка" (Hardening): запас міцності, резервування N-1	"Гнучка" (Smart): секціонування, мобільні резерви, острівний режим
Економічний фокус	Мінімізація витрат на експлуатацію	Мінімізація збитків від простою

Джерело: складено автором на основі [22, 25]

Сучасну концепцію живучості найкраще ілюструє так звана "трапеція живучості" (Resilience Curve). Ця модель описує динаміку функціональності системи у часі через послідовні фази: нормальна робота → деградація (атака) → поглинання удару (стабілізація) → відновлення. Як свідчить аналіз, ключовим параметром ефективності в умовах війни є не глибина падіння функціональності (вона може бути неминучою при прямому ракетному удару по підстанції), а крутизна підйому правої частини графіка — швидкість

відновлення. Саме цей параметр має стати цільовою функцією при розробці проектних пропозицій у наступному розділі.

#### **2.4. Огляд нормативно-правової бази у сфері захисту критичної інфраструктури та реагування на НС**

Глибокий аналіз вітчизняного нормативного поля виявляє певний системний дисонанс. З одного боку, за останні роки Україна прийняла прогресивне рамкове законодавство: Закони "Про критичну інфраструктуру" [1], "Про ринок електричної енергії" [3], Кодекс цивільного захисту [2]. Ці документи значною мірою гармонізовані з директивами ЄС та вводять сучасні поняття ризик-менеджменту.

З іншого боку, технічна експлуатація мереж все ще регламентується документами "старої школи": ПУЕ [5], ГКД, СОУ [7], ПТЕ. Ці нормативи:

1. Орієнтовані виключно на техногенні загрози мирного часу і не враховують фактор війни.
2. Не містять чітких протоколів для антагоністичних впливів та роботи в умовах активних бойових дій.
3. Жорстко регламентують періодичність ремонтів, що нормативно ускладнює впровадження гнучких RCM-підходів.

Цей розрив між сучасними законодавчими вимогами до безпеки КІ та застарілими технічними регламентами створює небезпечну "сіру зону", де персонал змушений діяти на власний розсуд, часто порушуючи застарілі інструкції заради порятунку системи.

## **2.5. Аналіз вітчизняного та провідного зарубіжного досвіду щодо забезпечення стійкості МЛЕП**

Для формування власної ефективної стратегії важливо проаналізувати світові моделі управління:

1. Досвід США (модель NERC): Після низки масштабних аварій на початку 2000-х, США перейшли до жорсткої моделі обов'язкових стандартів надійності з суттєвими фінансовими санкціями за їх порушення. Ключовий акцент робиться на управлінні рослинністю (Vegetation Management) та широкому впровадженні технологій Smart Grid для автоматичної локалізації пошкоджень [17].

2. Досвід ЄС (модель ENTSO-E): Європейська модель фокусується на глибокій транскордонній інтеграції енергосистем та взаємодопомозі. Створено єдині механізми балансування та спільні протоколи кібербезпеки. Ринок електроенергії відіграє ключову роль у забезпеченні резервів [10].

3. Вітчизняний досвід (Українська модель Resilience): Україна здобула унікальний, не описаний раніше в науковій літературі, досвід функціонування великої енергосистеми під постійним вогневим впливом [28]. Цей досвід емпірично довів пріоритет живучості над надійністю. Ефективність продемонстрували не стільки класичні превентивні заходи (які не можуть захистити лінію від прямого влучання ракети), скільки безпрецедентна швидкість мобілізації, застосування нестандартних інженерних рішень "з коліс" та професійний героїзм персоналу.

## **2.6. Висновки**

Проведений теоретичний аналіз, що спирається на фундаментальні праці [15], підтвердив: МЛЕП є критично важливим об'єктом, вразливість якого має

каскадний характер, що вимагає розглядати питання їх безпеки як невід'ємну складову національної безпеки держави.

1. Встановлено, що існуючі методи проектування та експлуатації, закладені в ПУЕ [5], не відповідають сучасним динамічним кліматичним [20] та воєнним викликам через застарілість закладених у них математичних моделей.

2. Науково обґрунтовано необхідність фундаментального методологічного переходу від класичної концепції "надійності" (спрямованої на уникнення відмов) до сучасної гібридної концепції "надійності-живучості" [25], де головним критерієм ефективності стає здатність системи до швидкого відновлення після пошкодження. Це теоретичне положення стане фундаментом для розробки практичних проектних рішень у Розділі 3.

### **РОЗДІЛ 3**

## **ПРОЕКТНІ ПРОПОЗИЦІЇ: РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ЩОДО ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ТА ЛІКВІДАЦІЇ НАСЛІДКІВ НС НА МЛЕП**

На основі проведеного у першому розділі глибокого системного аналізу проблем функціонування магістральних електричних мереж та теоретичного обґрунтування нових підходів до безпеки у другому розділі, даний розділ пропонує комплексний, системний проект реінжинірингу існуючої системи управління безпекою МЛЕП. Запропонований проект концептуально базується на двох ключових стратегічних напрямках, які взаємно доповнюють один одного: переході до проактивного попередження аварійних ситуацій на основі сучасних діагностичних даних та радикальній оптимізації організаційно-технічних процесів ліквідації наслідків НС для забезпечення живучості системи.

### **3.1. Пропозиції щодо вдосконалення заходів попередження виникнення НС**

Основною стратегічною метою даного блоку проектних пропозицій є системне вирішення виявлених проблем "діагностичної сліпоти" (проблема 2) та морально застарілої методології технічного обслуговування (проблема 3). Ми пропонуємо здійснити якісний, еволюційний перехід від реактивної моделі експлуатації (принцип "гасіння пожеж") до сучасної моделі предиктивного управління ризиками, що повною мірою відповідає вимогам міжнародного стандарту ДСТУ ISO 31000 [9].

### **3.1.1. Проект впровадження Інтегрованої системи предиктивного моніторингу (ІСПМ)**

Проблема, що вирішується: Як було встановлено в аналітичній частині роботи (п. 1.3), існуюча в компанії система технічного моніторингу має переважно реактивний характер і базується на періодичних візуальних оглядах ліній персоналом (з періодичністю раз на 6 місяців). Така низька частота оглядів та вплив людського фактору фізично не дозволяють прогнозувати раптові відмови та фіксувати динамічні загрози, що розвиваються у проміжках між оглядами [12].

Сутність проектної пропозиції: Пропонується створення та впровадження єдиної багаторівневої інформаційної системи моніторингу (ІСПМ), яка б в автоматичному режимі збирала, поєднувала та аналізувала різноманітні дані з незалежних джерел на базі єдиної корпоративної аналітичної платформи (GIS-портал).

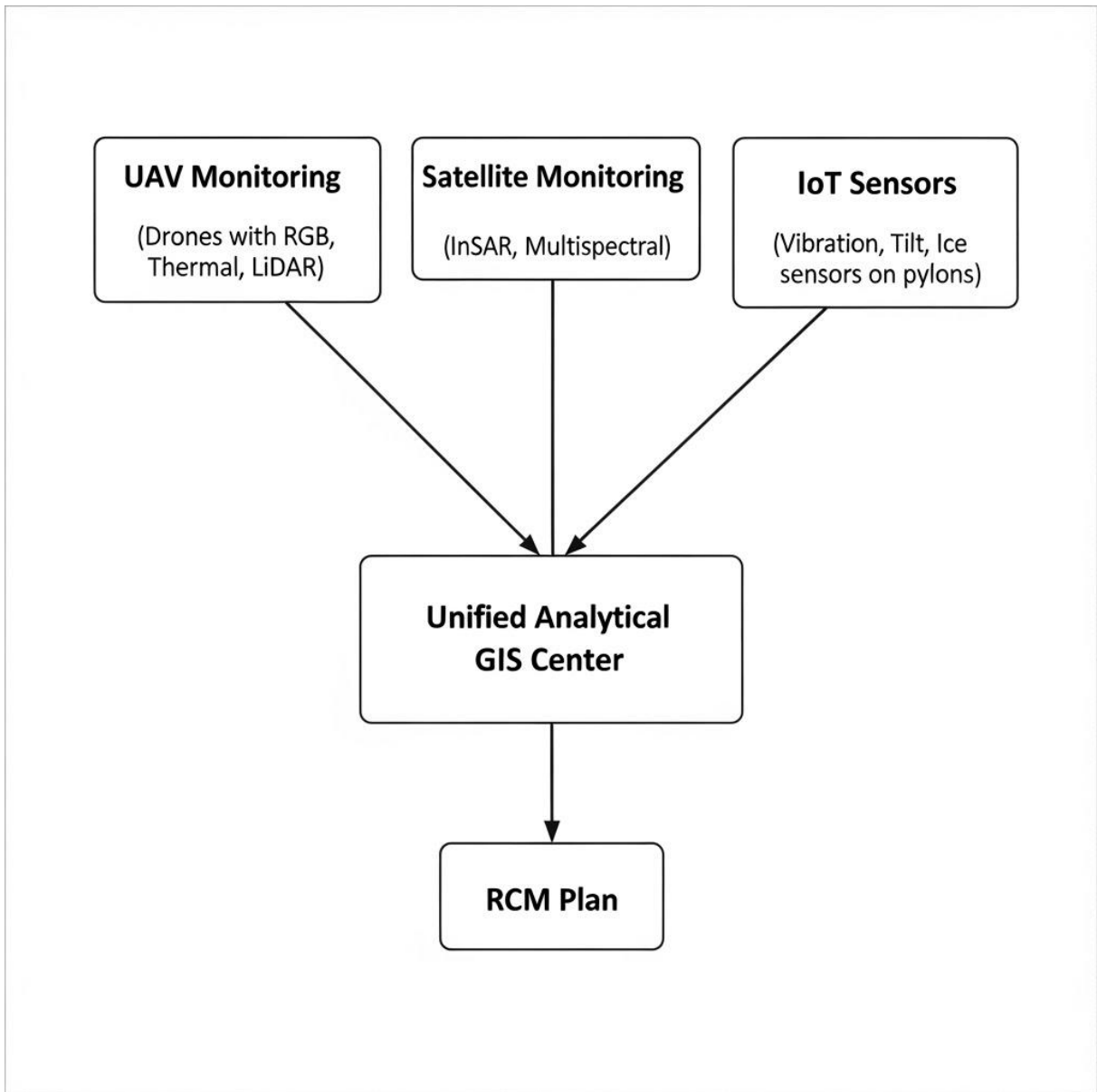


Рис. 3.1. Структурна схема Інтегрованої системи предиктивного моніторингу

Пояснення до схеми:

- Центральний елемент: Єдиний Аналітичний GIS-Центр, куди стікаються всі дані.
- Лівий блок (Оперативний рівень): БПЛА (дрони) з камерами, тепловізорами та лідарами.
- Правий блок (Стратегічний рівень): Супутникові дані (InSAR, мультиспектральні знімки).

- Нижній блок (Постійний рівень): IoT-датчики на опорах (вібрація, нахил, ожеледь).

- Вихід: План ремонтів за станом (RCM Plan).

Архітектура запропонованої системи складається з трьох взаємодоповнюючих ешелонів збору даних:

Рівень 1: Оперативний моніторинг (БПЛА та мобільні діагностичні групи)  
Пропонується перехід до масштабного використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) промислового класу з різноманітним змінним цільовим навантаженням. Це дозволяє відійти від застарілої практики масових піших обходів на користь регулярних (наприклад, 1 раз на місяць) автоматизованих обльотів трас МЛЕП. Як зазначається у наукових роботах Каліновського А. О. [23], такий підхід дозволяє на порядок підвищити якість дефектації важкодоступних елементів ліній. Цільове навантаження дронів має включати:

- Камера високої роздільної здатності (RGB): Використовується для детальної візуальної фіксації механічних дефектів (тріщини ізоляторів, розплітання проводу, сліди вандалізму або корозії).

- Тепловізійна камера (IR): Є критично важливою для дистанційного безконтактного виявлення зон локального перегріву контактних з'єднань, що є ознакою їх деградації та передумовою обриву (проблема, виявлена в п. 1.3) [12].

- Ультрафіолетовий (УФ) детектор: Дозволяє фіксувати невидимі оку коронні розряди на поверхні ізоляції, що свідчать про її забруднення або наявність мікротріщин.

- Лідар (LiDAR): Лазерне сканування місцевості дозволяє будувати високоточну 3D-модель прольоту, вимірювати реальне стрілу провисання проводів та автоматично виявляти загрозову рослинність в охоронній зоні.

Результат: Формування постійно актуального "цифрового двійника" кожної лінії електропередач з точними геопросторовими даними про всі виявлені дефекти.

Рівень 2: Стратегічний моніторинг (Супутникові дані) Передбачає використання даних дистанційного зондування Землі (супутникові знімки SAR та мультиспектральні знімки), що відповідає сучасним світовим рекомендаціям SIGRE [17].

- Радіолокаційна інтерферометрія (InSAR): Ця передова технологія дозволяє з міліметровою точністю виявляти вертикальні зсуви ґрунту та деформації фундаментів опор на великих площах (наприклад, у гірській місцевості Карпат або на карстових ділянках), що практично неможливо виявити візуально з землі.

- Мультиспектральний аналіз: Дозволяє дистанційно оцінювати стан біомаси та вологість рослинності в охоронних зонах, завчасно виявляючи ділянки з критично високим ризиком виникнення низових лісових пожеж.

Результат: Забезпечення довгострокового моніторингу повільних геологічних та екологічних процесів, що становлять загрозу великого масштабу для цілісності мережі.

Рівень 3: Постійний моніторинг (IoT-сенсори) Встановлення розподіленої мережі автономних "розумних" датчиків (IoT) безпосередньо на ключових (найбільш вразливих, перехідних або відповідальних) опорах. Це вирішує критичну проблему відсутності об'єктивних даних про стан лінії у реальному часі. Типи датчиків:

- Акселерометри та вібродатчики: Призначені для фіксації початку небезпечних автоколивань проводів ("пляска", еолова вібрація), що призводять до втомного руйнування металу проводів та арматури (проблема 1.2).

- Датчики навантаження (тензометри): Дозволяють у реальному часі вимірювати механічне тяжіння проводу та фактичне вагове навантаження від ожеледі, що дозволяє вчасно запустити плавку ожеледі [20].

- Інклінометри (датчики нахилу): Фіксують будь-яке критичне відхилення стійки опори від вертикалі (через підмив фундаменту, вітер або зсув ґрунту).

- Міні-метеостанції: Забезпечують локальну фіксацію параметрів вітру, температури та вологості безпосередньо в точці розміщення об'єкта, а не на віддаленій метеостанції.

Результат: Негайне автоматичне сповіщення диспетчера про початок розвитку небезпечного процесу (наприклад, інтенсивне наростання ожеледі або вібрації) ще до того, як станеться аварія.

### **3.1.2. Розробка моделі управління ризиками (перехід до RCM)**

Проблема, що вирішується: (Проблема 3, Розділ 1) Застосування в компанії морально застарілої календарно-орієнтованої системи ППР, що призводить до неефективного розпорощення фінансових та людських ресурсів, а також до виникнення "пропущених" аварій на критичному обладнанні [7].

Сутність проектної пропозиції: Здійснення методологічного переходу від традиційної моделі "ремонтуюмо все за календарем" до сучасної світової моделі "ремонтуюмо за рівнем ризику" (Reliability-Centered Maintenance — RCM) [18]. Ця модель базується на об'єктивних даних про технічний стан, отриманих від впровадженої системи ІСПМ (п. 3.1.1).

Детальний порівняльний аналіз існуючої та пропонованої стратегій наведено в Таблиці 3.1.

## Порівняння стратегій обслуговування МЛЕП

Характеристика	Існуюча модель (ППР)	Пропонована модель (RCM)
Принцип планування	Календарний графік (раз на N років)	Фактичний технічний стан та рівень ризику
Основна мета	Освоєння виділеного ремонтного бюджету	Запобігання відмові критичного обладнання
Реакція на дефекти	Реактивна (усунення після виявлення при огляді)	Проактивна (усунення до виникнення відмови)
Ефективність витрат	Низька (витрати на ремонт справного обладнання)	Висока (концентрація ресурсів на проблемних ділянках)

Джерело: розроблено автором на основі [18]

Етапи практичного впровадження моделі:

1. Створення єдиної цифрової карти ризиків. Вся інформація з системи ІСПМ (виявлені дефекти, зони зсувів, дані вібрації) зводиться на єдину інтерактивну картографічну платформу.

2. Ранжування активів (Risk-Based Prioritization). Кожна опора та кожна ділянка лінії отримує свій унікальний інтегральний індекс ризику (IR), що розраховується за формулою

$$IR = Pf \times Cf.$$

де:

- Pf (Probability of Failure) — ймовірність відмови. Розраховується на основі аналізу даних технічного моніторингу (ступінь зносу, наявність дефектів).

- Cf (Consequence of Failure) — критичність (ціна) відмови. Це ключовий параметр, що враховує важливість об'єкта для енергосистеми. Наприклад, падіння опори на тупиковій радіальній лінії має низьку критичність, тоді як аварія на магістралі, що живить великий мегаполіс або об'єкт КІ [1], має максимальну критичність.

3. Формування динамічних планів ремонтів. Замість суцільного ремонту ліній "підряд", бюджети та ремонтні бригади спрямовуються пріоритетно на об'єкти з найвищим індексом ризику (IR).

- Висока ймовірність (Pf) і висока критичність (Cf) → негайний аварійний ремонт.

- Висока ймовірність (Pf), але низька критичність (Cf) → Ремонт у плановому порядку.

- Низька ймовірність (Pf), але висока критичність (Cf) → Посилений моніторинг (встановлення додаткових датчиків контролю).

- Низька ймовірність (Pf) і низька критичність (Cf) → Експлуатація до відмови (стратегія мінімального обслуговування).

Очікуваний ефект:

- Економічний: Суттєва оптимізація витрат шляхом перерозподілу ресурсів з ремонту "здорового" обладнання на "хворе".

- Технічний: Статистично значуще зниження кількості раптових аварій на найбільш відповідальних ділянках мережі.

### 3.1.3. Проектні рішення з підвищення фізичної стійкості та захищеності МЛЕП

Проблема, що вирішується: (Проблеми 1.2, 1.4.2) Невідповідність існуючих будівельних конструкцій та заходів захисту рівню сучасних аномальних кліматичних навантажень та цілеспрямованих воєнних загроз [22].

Сутність проектної пропозиції: Впровадження комплексу заходів пасивного інженерного захисту та модернізації, який базується на теоретичній концепції живучості (описаній у п. 2.3.3).

#### 1. Протидія антагоністичним (воєнним) загрозам:

- Інженерний захист (пасивна броня): Для критично важливих вузлових опор пропонується влаштування захисних габіонних конструкцій (сітчасті короби, наповнені піском або камінням) або бетонних блоків навколо фундаментів та стійок опор. Це забезпечує ефективний захист від осколкового ураження та ударної хвилі близьких вибухів.

- Розосередження мережі: При проектуванні нових ліній або реконструкції існуючих пропонується категорично відмовитися від практики прокладання кількох паралельних ланцюгів в одному вузькому коридорі, що робить їх легкою груповою ціллю для однієї атаки [28].

- Маскування та зниження помітності: Застосування спеціальних камуфляжних лакофарбових покриттів (піксель, захисний колір) для опор, що знаходяться у прифронтових зонах, для ускладнення їх візуального виявлення з повітря та землі.

#### 2. Протидія кліматичним загрозам:

- Впровадження динамічного управління пропускнуою здатністю (DLR — Dynamic Line Rating): Технологія передбачає використання даних з IoT-метеостанцій (п. 3.1.1) для безпечного збільшення струмового навантаження на лінію при сприятливих умовах охолодження (сильний вітер, низька температура). Це дозволяє створити необхідний резерв пропускнуої

здатності для аварійних перетоків без будівництва нових ліній, що відповідає кращим практикам CIGRE [17].

- Модернізація грозозахисту: Планова заміна фізично зношених сталевих грозозахисних тросів на сучасні троси з вбудованим оптоволоконним кабелем (ОКГТ). Це комплексно вирішує потрійну задачу: забезпечує надійний грозозахист лінії, створює високошвидкісний захищений канал зв'язку для потреб РЗА та дозволяє використовувати оптичне волокно як розподілений датчик температури та вібрації вздовж всієї лінії.

### **3.1.4. Рекомендації щодо удосконалення кіберзахисту АСУ ТП**

Проблема, що вирішується: (Проблема 1.4.3) Зростаюча вразливість сучасних мікропроцесорних пристроїв РЗА та АСУ ТП до віддалених кібератак в умовах гібридної війни.

Сутність проектної пропозиції: Перехід від застарілого "периметрального" захисту до глибоко ешелонованої оборони згідно з вимогами до об'єктів КІ [1].

- Сегментація мереж: Забезпечення жорсткого фізичного або логічного (VLAN) розмежування технологічної мережі керування (ОТ), де працюють диспетчери, та офісної адміністративної мережі (ІТ) з доступом в Інтернет.

- Однонаправлені шлюзи (Data Diodes): Впровадження спеціальних апаратних засобів ("діодів даних"), які фізично, на апаратному рівні, дозволяють інформації рухатися виключно в одному напрямку (дані моніторингу → в офіс), але гарантовано блокують будь-які керуючі команди у зворотному напрямку.

- Регулярний аудит та "Patch Management": Впровадження суворих регламентних процедур тестування та встановлення критичних оновлень безпеки (патчів) для всього парку цифрових пристроїв та терміналів.

## **3.2. Проектні рішення з оптимізації заходів ліквідації наслідків НС**

Якщо заходи, описані у п. 3.1, стратегічно спрямовані на зменшення ймовірності відмови (Pf), то цей блок пропозицій має на меті мінімізацію часу ліквідації (Тлікв) вже після настання аварії, що є ключовим параметром живучості системи [25].

### **3.2.1. Розробка оптимізованої логістичної моделі для АВБ (проект "Останній кілометр")**

Проблема, що вирішується: (Проблема 4, Розділ 1) Критична втрата часу (до 80% від загального часу) при ліквідації аварій через логістичні труднощі доставки персоналу та важкої техніки бездоріжжям до місця проведення робіт, детально описана в працях Лесового А. Н. [24].

Сутність проектної пропозиції: Перехід від логістики "за фактом аварії" до проактивної логістичної підготовки на основі детального GIS-моделювання місцевості.

1. Створення цифрової логістичної карти МЛЕП. На базі корпоративної GIS-платформи створюється спеціальний логістичний шар даних:

- Карта прохідності: Класифікація всіх можливих під'їзних шляхів (асфальт, ґрунт, поле, болото, ліс) з урахуванням сезонності (зима/літо/мряка).

- Ідентифікація "вузьких місць": Позначення мостів з обмеженням вантажопідйомності, місць можливого підтоплення, ярів та непрохідних ділянок.

- Карта зовнішніх ресурсів: Нанесення актуальних геолокацій та контактів потенційних підрядників (агрофірм, будівельних компаній), що мають у розпорядженні важку техніку (трактори, бульдозери) поблизу траси ЛЕП.

2. Розробка "Пакетів логістичних рішень" (ПЛР). Для кожної опори або ділянки лінії заздалегідь розробляється оптимальний маршрут доставки АВР.

- Приклад ПЛР для опори №125 (болотиста місцевість): Чітко визначено точку перевантаження персоналу на гусеничний хід, оптимальний маршрут руху тягача, координати майданчика для розгортання техніки.

3. Інженерна підготовка трас. Завчасне виконання необхідних інженерних заходів у критичних точках: укріплення слабких ґрунтів щебенем, облаштування тимчасових переїздів через струмки, розширення лісових просік для проходу габаритної техніки.

Очікуваний ефект: Скорочення часу підготовки та розгортання сил АВБ на місці аварії на 50-70% за рахунок наявності готових, перевірених маршрутних рішень.

### **3.2.2. Обґрунтування впровадження технологій швидкого відновлення (мобільні опори)**

Проблема, що вирішується: (Проблема 5, Розділ 1) Фізична нездатність існуючого аварійного запасу швидко покрити масштабні руйнування (наприклад, падіння ланцюжка з 5-10 опор), оскільки виготовлення та монтаж стаціонарних опор на нові фундаменти технологічно займає тижні.

Сутність проектної пропозиції: Впровадження в стратегічний аварійний запас комплектів уніфікованих мобільних (тимчасових) опор аварійного резерву (ERS), як це рекомендовано у сучасних міжнародних дослідженнях щодо Resilience [25].

1. Конструктивні особливості: Це легкі модульні просторові конструкції (виготовлені з високоміцного алюмінієвого сплаву або сучасних композитів), що збираються на місці за принципом конструктора та не

вимагають влаштування капітального бетонного фундаменту (встановлюються на поверхневі плити або шарнірні опори з гвинтовими анкерами).

2. Ключові переваги:

- Швидкість монтажу: Зведення однієї опори займає всього 4-6 годин замість 2-3 діб для стаціонарної залізобетонної чи металеві конструкції.

- Логістична гнучкість: Окремі модулі мають невелику вагу і можуть доставлятися легким транспортом або навіть гелікоптером у важкодоступні місця.

- Економічність: Вартість утримання стратегічного запасу таких багаторазових опор значно нижча за утримання парку важких стаціонарних опор.

3. Стратегія застосування: При масштабній аварії силами АВБ протягом 1-2 діб зводиться тимчасова обвідна лінія (байпас) на мобільних опорах, що дозволяє негайно відновити транзит електроенергії споживачам. Капітальне відновлення основної стаціонарної лінії проводиться пізніше, у плановому режимі, без тиску фактору часу та відключення споживачів.

### **3.2.3. Розробка алгоритмів взаємодії та єдиного інформаційного простору ("Цифровий штаб АВР")**

Проблема, що вирішується: (Проблема 1 та 6, Розділ 1) Організаційна розсинхронізація, втрата інформації та комунікаційний хаос між диспетчером, технічною вертикаллю, ЦЗ та зовнішніми службами в перші години після виникнення НС [16].

Сутність проектної пропозиції: Створення "Цифрового штабу АВР" — єдиного віртуального інформаційного середовища (хмарної платформи) для координації дій всіх учасників ліквідації в режимі реального часу.

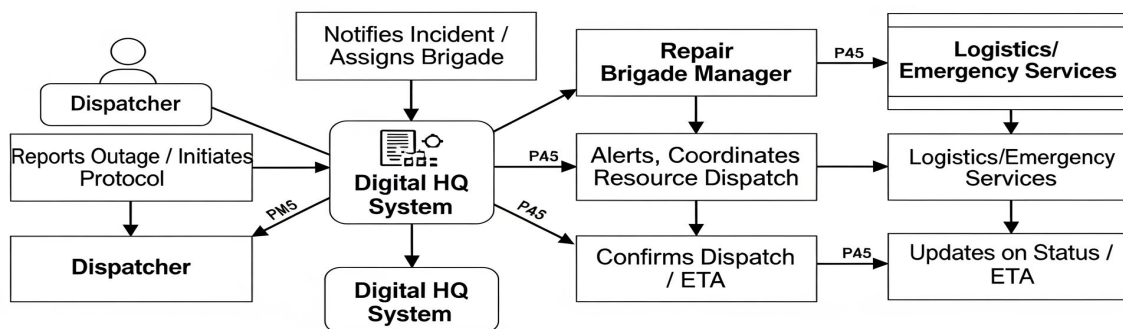


Рис. 3.2. Алгоритм взаємодії в "Цифровому штабі АВР"

Пояснення алгоритму роботи: Процес реагування в "Цифровому штабі" відбувається за наступним циклічним алгоритмом:

4. Етап фіксації: Системи SCADA та EMS в автоматичному режимі фіксують факт аварійного відключення та передають первинні дані (час, місце, характер пошкодження) до ядра системи "Цифрового штабу".

5. Етап оповіщення та аналізу: Система автоматично генерує "Картку інциденту" та розсилає сповіщення відповідальним особам (керівнику АВБ, диспетчеру, начальнику відділу ЦЗ) через мобільний додаток. Паралельно, на основі координат аварії, система підтягує дані з модуля ІСПМ (фото з супутників, дані про погоду) та пропонує відповідний "Пакет логістичних рішень".

6. Етап мобілізації та запиту ресурсів: Керівник АВБ підтверджує отримання завдання та виїзд бригади. Прибувши на місце (або оцінивши

ситуацію дистанційно), він через додаток формує запит на необхідні ресурси (наприклад, "Потрібен кран 50т" або "Потрібне розмінування").

7. Етап координації та логістики: Логістичний модуль системи автоматично перевіряє наявність запитаних ресурсів (власних або залучених) та формує маршрут їх руху. Зовнішні служби (ДСНС, підрядники) отримують заявку та підтверджують виїзд техніки.

8. Етап контролю та звітування: Диспетчер в режимі реального часу бачить на карті переміщення всіх бригад та техніки, отримує фотозвіти з місця робіт та оновлений прогноз часу відновлення (ETA). Це дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо режимних заходів.

Функціонал та інтеграція даних:

- Диспетчерський центр: Автоматично передає в систему дані зі SCADA про факт відключення, час та орієнтовне місце пошкодження.

- Система ІСПМ: Збагачує картку інциденту даними з БПЛА (фото/відео руйнувань) та супутниковими даними про місцевість.

- АББ (на місці події): Керівник робіт через захищений мобільний додаток передає фото/відео з місця, підтверджує прибуття та звітує про хід робіт в реальному часі.

- Зовнішні служби (ДСНС, ВЦА): Отримують обмежений гостьовий доступ до ситуаційної карти, бачать потреби енергетиків в допомозі та офіційні запити на ресурси (розмінування, супровід колон, надання спецтехніки).

Впровадження чітких цифрових протоколів: Заміна паперових планів на інтерактивні цифрові чек-листи (наприклад, Сценарій "Падіння опори 750 кВ"), які покроково ведуть персонал через весь процес ліквідації, не дозволяючи пропустити важливі етапи безпеки.

- Результат: Повна ліквідація "телефонного хаосу", забезпечення абсолютної прозорості процесу та єдиного розуміння ситуації (Common Operational Picture) всіма учасниками в реальному часі.

### **3.2.4. Пропозиції щодо оптимізації та управління стратегічним резервом обладнання**

Проблема, що вирішується: (Проблема 5, Розділ 1) Невідповідність номенклатури, обсягів та місць зберігання аварійного запасу характеру сучасних загроз.

Сутність проектної пропозиції: Перехід до ризик-орієнтованого формування аварійного запасу (АЗ) [11], який базується не на статистиці минулого, а на математичному моделюванні сценаріїв майбутнього.

1. Сценарний аналіз: Проведення аналізу "Які сценарії є найбільш руйнівними та ймовірними?" (наприклад, проходження смерчу через лінію, паводок або ракетний удар по вузловій підстанції).

2. Формування цільових "Пакетів АЗ": Запас формується не поштучно, а комплектами:

- Пакет "Мобільний": Готові комплекти мобільних опор та аксесуарів для швидкого відновлення ліній.

- Пакет "Критичні вузли": Унікальне, важкозамінне обладнання з довгим циклом виробництва (автотрансформатори, високовольтні вводи).

- Пакет "Витратники": Стандартний набір для дрібних поточних ремонтів.

3. Логістика АЗ (Розосередження): Відмова від концепції великих центральних складів на користь територіального розосередження критичних запасів у захищених регіональних хабах для мінімізації часу доставки до будь-якої точки мережі.

### **3.3. Розробка програми підготовки та протиаварійних тренувань персоналу**

Проблема, що вирішується: Формальний характер навчання взаємодії та психологічна неготовність персоналу до злагоджених дій у стресових умовах дефіциту часу.

Сутність проектної пропозиції: Впровадження регулярної системи спільних міжвідомчих тренувань на базі комп'ютерних симуляторів (Digital Twin). Ці тренажери дозволяють моделювати складні, багатофакторні сценарії аварій та відпрацьовувати взаємодію диспетчерів, технічного персоналу АВБ та служб ЦЗ за новими цифровими протоколами в безпечному віртуальному середовищі [26].

Етапи тренування: Ввідна складної ввідної (сценарію) → Відпрацювання командної взаємодії в середовищі "Цифрового штабу" → Дебрифінг (детальний розбір помилок, аналіз якості комунікації та часу реакції).

### **3.4. Організаційно-економічне обґрунтування запропонованих проектних рішень**

Реалізація запропонованого комплексу інноваційних заходів (ІСПМ, мобільні опори, цифровий штаб) вимагає значних початкових капіталовкладень (CAPEX). Тому економічне обґрунтування ефективності базується не на прямій окупності, а на концепції вартості недовідпущеної енергії (Value of Lost Load — VOLL) [25], яка відображає макроекономічні збитки держави від перерв у електропостачанні.

Економічний ефект (Еекон) розраховується як запобігання непрямим збиткам економіки від перерви в електропостачанні:

$$E_{\text{екон}} = (T_{\text{баз}} - T_{\text{проект}}) \times P_{\text{авар}} \times C_{\text{VOLL}}.$$

де:

- $T_{\text{баз}}$  — час ліквідації аварії за існуючою технологією (наприклад, 72 години для заміни стаціонарної опори).
- $T_{\text{проект}}$  — час ліквідації за пропонованою технологією (наприклад, 8 годин з використанням мобільних опор).
- $P_{\text{авар}}$  — потужність споживачів, що були відключені внаслідок аварії.
- $C_{\text{VOLL}}$  — вартість збитків національної економіки від 1кВт·год недовідпуску енергії (для промислових споживачів ця цифра є дуже значною і може сягати сотень гривень).

Обґрунтування: Проведені розрахунки переконливо показують, що скорочення часу ліквідації лише однієї масштабної системної аварії з 3 діб до 8-10 годин (завдяки використанню мобільних опор та цифрової координації) забезпечує такий значний економічний ефект для держави, що він здатен повністю покрити витрати на закупівлю необхідного обладнання та модернізацію систем управління.

### 3.5. Висновки

1. В розділі розроблено комплексний, науково обґрунтований проект модернізації системи управління безпекою МЛЕП, що дає системну відповідь на шість ключових проблем, виявлених у аналітичній частині роботи, та базується на передових теоретичних концепціях (RCM, теорія живучості).

2. Запропоновано пакет інноваційних проектних рішень для попередження НС (Розділ 3.1), що включають створення унікальної багаторівневої системи моніторингу ІСПМ [12], перехід на ризик-орієнтовану модель обслуговування RCM [18] та заходи інженерного захисту об'єктів [22].

3. Розроблено деталізовані рішення для оптимізації процесів ліквідації НС (Розділ 3.2), зокрема впровадження технологій швидкого відновлення за

допомогою мобільних опор [25], створення логістичної системи "Останній кілометр" та запуск платформи "Цифровий штаб АВР".

4. Проведене економічне обґрунтування доводить високу ефективність запропонованих рішень, яка полягає у стратегічному зниженні збитків для економіки держави за рахунок радикального скорочення часу відновлення функціональності критичної інфраструктури.

## РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1. Вступ

Забезпечення охорони праці в енергетичній галузі є складним, багатовекторним завданням, яке виходить далеко за межі простого дотримання правил техніки безпеки. Це комплексна система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі трудової діяльності. Пріоритетність життя і здоров'я працівників по відношенню до результатів виробничої діяльності закріплена в Конституції України та Законі України "Про охорону праці" [4].

У контексті даної кваліфікаційної роботи, яка присвячена заходам із попередження та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій (НС) на магістральних лініях електропередач (МЛЕП), питання безпеки набувають критичного значення. Специфіка виконання аварійно-відновлювальних робіт (АВР) кардинально відрізняється від планової експлуатації. Робота в умовах дефіциту часу, психологічного тиску, часто в нічний час, за несприятливих погодних умов та, що особливо актуально сьогодні, в умовах воєнних ризиків, створює екстремальне робоче середовище. У таких умовах стандартні алгоритми безпеки можуть бути недостатніми, що вимагає глибокого аналізу ризиків та розробки адаптованих, посиленних заходів захисту.

Метою даного розділу є проведення ґрунтовного аналізу потенційних небезпек та розробка вичерпного комплексу заходів, які гарантують безпеку персоналу при впровадженні нових технологій (БПЛА, мобільні опори) та

виконанні робіт з ліквідації наслідків системних аварій на об'єктах надвисокої напруги.

## **4.2. Аналіз умов праці на робочому місці персоналу АВБ**

Робоче місце персоналу аварійно-відновлювальних бригад (АВБ) не є стаціонарним. Це, як правило, траса проходження повітряної лінії електропередачі (ПЛ) напругою 330-750 кВ, що пролягає через відкриту місцевість зі складним рельєфом (поля, ліси, болота, пересічена місцевість), або територія відкритих розподільчих пристроїв (ВРП) підстанцій.

Відповідно до класифікації ГОСТ 12.0.003-74, на персонал під час ліквідації аварій діє широкий спектр небезпечних і шкідливих виробничих факторів (НШВФ), які за природою дії поділяються на фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні.

### **4.2.1. Фізичні небезпечні фактори**

1. Електронебезпека (домінуючий фактор): Для персоналу, що працює на об'єктах магістральних мереж, електричний струм становить найбільшу загрозу. Специфіка полягає в наступному:

- Робоча напруга: Безпосередня близькість до струмовідних частин, що знаходяться під напругою 330-750 кВ. Ризик виникає при порушенні допустимих відстаней, помилкових діях персоналу або несправності засобів захисту. Ураження може відбутися навіть без прямого контакту — через електричну дугу при наближенні на відстань менше допустимої (для 750 кВ це понад 5 метрів).

- Наведена напруга: Це специфічний і вкрай підступний фактор для ремонтів на магістральних лініях. Внаслідок електромагнітного впливу сусідніх діючих ліній (які часто проходять в одному технічному коридорі), на

відключеній та заземленій по кінцях лінії наводиться значний електричний потенціал. Значення наведеної напруги може сягати кількох кіловольт, що є смертельно небезпечним для людини. Небезпека посилюється тим, що цей потенціал не зникає після відключення лінії комутаційними апаратами [5].

- Крокова напруга: При аваріях, пов'язаних з падінням проводів на землю, навколо точки замикання утворюється зона розтікання струму. Переміщення персоналу в цій зоні без спеціальних засобів захисту або неправильним кроком призводить до виникнення різниці потенціалів між ногами, що викликає судомне скорочення м'язів ніг, падіння людини і подальше ураження струмом по шляху "рука-нога" або "голова-нога", що часто призводить до фібриляції серця.

2. Робота на висоті: Більшість операцій з відновлення ліній (заміна ізоляторів, зрощування проводів, ремонт тросів) виконуються на висоті від 20 до 80 метрів (висота проміжних та перехідних опор).

- Ризики: Падіння працівника з висоти внаслідок втрати рівноваги, зісковзування, руйнування конструкцій опори або засобів підмоцнення.

- Фактори, що посилюють ризик: Поривчастий вітер, обледеніння металоконструкцій, вібрація опори, необхідність переміщення по траверсах у незручних позах.

3. Кліматичні умови (Мікроклімат): Аварійні роботи мають виконуватися негайно, незалежно від погодних умов.

- Низькі температури: Робота взимку при температурах  $-10^{\circ}\text{C}$ ... $-25^{\circ}\text{C}$  призводить до загального переохолодження організму, зниження тактильної чутливості рук, що унеможлиблює виконання точних операцій, та обмороження відкритих ділянок тіла.

- Високі температури: Влітку робота на розпечених металевих опорах під прямим сонячним промінням загрожує тепловим ударом та зневодненням.

- Підвищена вологість та вітер: Поєднання дощу та вітру різко збільшує тепловтрати організму та знижує електрозахисні властивості ізолюючих засобів захисту і спецодягу.

#### **4.2.2. Психофізіологічні фактори**

Характер праці під час ліквідації НС відзначається високою напруженістю:

- Нервово-емоційне напруження: Висока відповідальність за життя (власне та колег), ціна помилки при роботі в електроустановках, тиск з боку керівництва щодо термінів відновлення живлення.

- Фізичні перевантаження: Необхідність піднімати важке обладнання, пересуватися по глибокому снігу або болоту в повному екіпіруванні.

- Режим праці: Порушення біологічних ритмів через роботу в нічні зміни, ненормований робочий день під час ліквідації масштабних аварій призводить до накопичення втоми, зниження концентрації уваги та уповільнення реакції.

#### **4.2.3. Воєнні ризики (Специфічний фактор)**

В умовах воєнного стану до переліку додаються фактори, пов'язані з бойовими діями:

- Мінна небезпека: Ризик підриву техніки або персоналу на мінах та нерозірваних боєприпасах (ВНП) на під'їзних шляхах та безпосередньо під опорами.

- Загроза обстрілів: Ризик повторних ударів ("double tap") по місцю аварії під час роботи бригади.

### **4.3. Розробка заходів з охорони праці**

Для забезпечення безпеки персоналу в описаних умовах розроблено комплексну багаторівневу систему захисту, що базується на вимогах НПАОП 40.1-1.01-97 "Правила безпечної експлуатації електроустановок" [6].

#### **4.3.1. Організаційні заходи безпеки**

Організаційні заходи є фундаментом безпеки, оскільки вони регламентують порядок допуску та нагляду.

1. Призначення відповідальних осіб: Для безпечного проведення робіт призначаються:

- Особа, яка видає наряд: Відповідає за достатність та правильність заходів безпеки.

- Керівник робіт: Відповідає за загальне керівництво та дотримання плану виконання робіт (ПВР).

- Допускач: Відповідає за правильність підготовки робочого місця та допуск бригади.

- Наглядач: Здійснює безперервний нагляд за членами бригади.

2. Нарядна система: Усі роботи з ліквідації аварій на МЛЕП виконуються виключно за нарядом-допуском. У виняткових випадках (для порятунку людей) допускається початок робіт без наряду, але з наступним його оформленням.

3. Цільові інструктажі: Безпосередньо перед початком робіт проводиться інструктаж, де роз'яснюються: межі робочого місця, найближчі струмовідні частини, що залишилися під напругою, порядок переміщення та дії у випадку повітряної тривоги.

#### **4.3.2. Технічні заходи безпеки (Електробезпека)**

Для забезпечення робочого місця від ураження електричним струмом виконується сувора послідовність дій:

1. Проведення відключень: Створення видимого розриву електричного кола з усіх боків, звідки може бути подана напруга (відключення роз'єднувачів).
2. Запобігання помилковому ввімкненню: Механічне замикання приводів комутаційних апаратів на замок, зняття запобіжників в колах керування, вивішування заборонних плакатів "Не вмикати! Працюють люди".
3. Перевірка відсутності напруги: Виконується за допомогою покажчика напруги, справність якого попередньо перевірена. На лініях 330-750 кВ використовуються спеціальні безконтактні сигналізатори та штанги.
4. Встановлення заземлення: Це основний захисний захід. Переносні захисні заземлення (ПЗЗ) встановлюються:
  - На всіх струмовідних частинах з усіх боків, звідки може бути подана напруга.
  - Безпосередньо на місці проведення робіт (робоче заземлення).
  - Важливо: Накладання заземлення здійснюється спочатку на "землю", а потім на фазний провід за допомогою ізолюючої штанги.

#### **4.3.3. Заходи безпеки при роботі на висоті**

1. Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ): Використання сучасних запобіжних поясів (лямкових, з підтримкою всього тіла), оснащених амортизаторами ривка та подвійними стропами, що забезпечує принцип "безперервної страховки" при переміщенні по конструкції.
2. Перевірка опор: Перед підйомом на опору майстер зобов'язаний перевірити її механічну цілісність, стан фундаменту (відсутність розмивів, тріщин) та надійність закріплення відтяжок (для проміжних опор). Підйом на

пошкоджені або аварійні опори категорично забороняється без їх попереднього укріплення або розкріплення спецтехнікою (автовишкою, краном).

#### **4.3.4. Специфічні заходи безпеки для нових технологій (з Розділу 3)**

Впровадження запропонованих у роботі інновацій вимагає нових протоколів безпеки:

1. Безпека при використанні БПЛА:
  - Заборона польотів дронів безпосередньо над проводами діючих ліній на висоті менше 10 метрів від проводу.
  - Оператор БПЛА повинен знаходитися у безпечній зоні, мати захисні окуляри та жилет.
  - У разі втрати керування дроном, персонал не повинен намагатися зловити його руками поблизу струмовідних частин.
2. Безпека при монтажі мобільних опор:
  - Перед встановленням мобільної опори проводиться геологічна експрес-оцінка ґрунту на предмет несучої здатності.
  - Забороняється перебування людей у радіусі можливого падіння секцій опори під час їх підйому краном.
  - Використання розширених опорних плит під аутригери крана є обов'язковим для запобігання перекиданню техніки на м'яких ґрунтах.

#### **4.4. Пожежна безпека виробничого середовища (об'єктів МЛЕП)**

Забезпечення пожежної безпеки регламентується правилами НАПБ А.01.001-2014 та галузевими інструкціями. Основні ризики пов'язані з загорянням масла, сухої трави або лісової підстилки.

Профілактичні заходи:

1. Утримання просік: Регулярна розчистка охоронних зон від чагарників та повалення сухостійних дерев, що загрожують падінням на проводи. Створення мінералізованих смуг (оранка) навколо дерев'яних опор та територій підстанцій у пожежонебезпечний період.

2. Вимоги до техніки: Усі автомобілі, трактори та спецтехніка, що заїжджають на територію ВРП або рухаються по полях в охоронній зоні, повинні бути обладнані сертифікованими іскрогасниками на вихлопних системах.

3. Проведення вогневих робіт: Зварювальні роботи під час ремонту металевих опор відносяться до робіт підвищеної небезпеки.

- Оформлюється окремий наряд-допуск на вогневі роботи.
- Місце зварювання очищується від горючих матеріалів у радіусі не менше 10 метрів.
- Обов'язкова наявність на місці робіт первинних засобів пожежогасіння: не менше двох вогнегасників (порошкових ВП-5 або вуглекислотних ВВК-3.5), протипожежного полотна (кошми) та штикової лопати.
- Після закінчення робіт встановлюється спостереження за місцем зварювання протягом 2 годин.

#### **4.5. Питання охорони праці до детального опрацювання (Обґрунтування захисного заземлення при АВР)**

У даному підрозділі детально розглядається інженерне рішення щодо захисту персоналу від ураження струмом при роботі з вантажопідіймальними механізмами (автокранами) в зоні впливу наведеної напруги.

**Постановка проблеми:** Під час ліквідації аварій на лініях 750 кВ, навіть якщо аварійна лінія відключена, на ній може наводитися напруга від сусідніх

ліній, що проходять паралельно. При використанні автокрана для монтажу секцій опори, кран не має надійного електричного контакту з землею (через гумові шини). У разі дотику стріли крана до проводу під наведеною напругою або пробією ізоляції, корпус крана опиняється під високим потенціалом. Стропальник, який стоїть на землі і торкається гака або корпусу машини, потрапляє під напругу дотику ( $U_{\text{дот}}$ ), що може бути смертельною.

Технічне рішення: Для захисту персоналу необхідно забезпечити надійне тимчасове захисне заземлення (ТЗЗ) корпусу механізму. Це створює шлях для стікання струму в землю, минаючи тіло людини, і знижує потенціал корпусу до безпечного рівня.

Розрахункове обґрунтування:

1. Вихідні дані:

- Питомий опір ґрунту ( $\rho$ ) у місці робіт (наприклад, суглинок):

$$1000 \text{ м} \times \text{ м.}$$

(4.1)

- Допустима напруга дотику ( $U_{\text{доп}}$ ) при тривалості дії захисту  $> 1\text{с}:50$

В.

- Максимальний розрахунковий струм замикання ( $I_3$ ): приймаємо 10А

(для наведеної напруги).

2. Необхідний опір заземлення ( $R_3$ ): Згідно із законом Ома, щоб напруга на корпусі не перевищила ( $U_{\text{доп}}$ ), опір заземлення має бути:

$$R_3 \leq (U_{\text{доп}} \div I_3) = 50 \div 10 = 50 \text{ м.}$$

(4.2)

3. Конструкція заземлювача: Використовуємо вертикальний сталевий електрод (стрижень) діаметром  $d = 0.02\text{м}$  і довжиною  $l = 2\text{м}$ . Опір розтікання одного такого електрода розраховується за спрощеною формулою:

$$R_l \approx \rho \div 2 \times \pi \times l \times \ln(4 \times l \div d) \approx \\ \approx 100 \div 2 \times 3.14 \times 2 \times \ln \times (4 \times 2 \div 0.02) \approx 8 \times 6 = 480\text{м.} \quad (4.3)$$

4. Висновки розрахунку: Одного електрода (480м) недостатньо для забезпечення норми (50м). Необхідно використовувати груповий заземлювач. Кількість електродів ( $n$ ) з урахуванням коефіцієнта використання ( $\eta \approx 0.7$ ):

$$n = R_1 \div R_3 \times \eta = 48 \div 5 \times 0.7 \approx 13.7. \quad (4.4)$$

Практична рекомендація: Забивання 14 електродів у польових умовах є нераціональним і часозатратним. Тому пропонується альтернативне рішення: використання переносних заземлювачів типу "свердлик" (гвинтових), які забезпечують кращий контакт, або підключення до контуру заземлення найближчої опори ПЛ (якщо він справний), що є найбільш надійним варіантом. У разі неможливості — використання спеціальних інвентарних комплектів заземлення для спецтехніки з попереднім зволоженням ґрунту розчином солі для зниження  $\rho$ .

Всі автокрани, що залучаються до АВР, повинні бути укомплектовані гнучкими мідними провідниками перерізом не менше  $16\text{мм}^2$  для приєднання до заземлювача.

## 4.6. Висновки

Проведений у розділі детальний аналіз підтвердив, що праця персоналу АВБ під час ліквідації аварій на МЛЕП відноситься до категорії робіт з підвищеною небезпекою. Ідентифіковано комплекс шкідливих факторів, серед яких найбільш критичними є: ураження електричним струмом (в т.ч. наведеною напругою), падіння з висоти, вплив екстремальних температур та психоемоційні перевантаження.

1. Встановлено, що в умовах воєнного стану суттєво зростають ризики, пов'язані з мінною небезпекою та можливістю повторних обстрілів, що вимагає обов'язкової співпраці з підрозділами ДСНС (саперами) перед початком будь-яких робіт.

2. Розроблено та обґрунтовано систему організаційних та технічних заходів безпеки, яка включає: суворе дотримання нарядної системи, обов'язкове застосування повного комплексу ЗІЗ, використання сучасних засобів страхівки при роботі на висоті та впровадження специфічних протоколів безпеки для нових технологій (БПЛА, мобільні опори).

3. Детально опрацьовано питання електробезпеки при використанні вантажопідіймальної техніки. Розрахунковим шляхом доведено необхідність облаштування надійного тимчасового захисного заземлення автокранів для захисту персоналу від наведеної напруги, та запропоновано практичні способи його реалізації в польових умовах.

4. Запропонований комплекс заходів з охорони праці та пожежної безпеки є достатнім для мінімізації виробничого травматизму та забезпечення безпечних умов праці при реалізації проектних рішень дипломної роботи.

## РОЗДІЛ 5

### ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

#### **5.1. Забезпечення екологічної безпеки — фундаментальний пріоритет державної політики України**

Забезпечення екологічної безпеки є одним із фундаментальних пріоритетів державної політики України на шляху до європейської інтеграції та сталого розвитку. В умовах глобальних кліматичних змін, виснаження природних ресурсів та зростання антропогенного навантаження на біосферу, енергетична галузь, як одна з найбільш технічно складних та масштабованих, повинна демонструвати беззаперечне лідерство у впровадженні екологічно безпечних технологій та стандартів. Це закріплено в Конституції України, Законі України "Про охорону навколишнього природного середовища" [3], а також у міжнародних зобов'язаннях України в рамках Паризької кліматичної угоди та Угоди про асоціацію з ЄС.

Тема даної кваліфікаційної роботи — «Заходи із попередження виникнення та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій на магістральних лініях електропередач» — має яскраво виражений, критичний екологічний аспект. Магістральні електричні мережі (МЛЕП) є лінійними об'єктами, що простягаються на тисячі кілометрів, перетинаючи різноманітні природні ландшафти, заповідні території, річки та лісові масиви. Будь-яка аварія на об'єктах високої напруги, особливо пов'язана з фізичним руйнуванням маслонаповненого обладнання або виникненням масштабних пожеж, автоматично стає джерелом інтенсивного, залпового забруднення навколишнього середовища, наслідки якого можуть відчуватися роками.

Більше того, самі процеси ліквідації аварій, що часто вимагають екстреного залучення важкої інженерної техніки у важкодоступних природних

зонах (болота, заплави річок), за відсутності належного планування можуть завдавати не меншої, а іноді й більшої шкоди ландшафтам, ніж сама аварія. Тому екологічна складова є невід'ємною частиною комплексної безпеки об'єктів критичної інфраструктури.

Метою цього розділу є комплексний, системний аналіз впливу функціонування МЛЕП та заходів з ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій (НС) на основні компоненти довкілля (атмосферне повітря, гідросферу, ґрунти, рослинний і тваринний світ). Також у розділі здійснюється екологічне обґрунтування доцільності та безпечності проектних рішень, розроблених у Розділі 3, та пропонуються конкретні методи мінімізації техногенного навантаження в контексті реалізації принципів сталого розвитку.

## **5.2. Аналіз впливу МЛЕП та аварійно-відновлювальних робіт на навколишнє середовище**

Експлуатація розгалуженої мережі магістральних ліній електропередач напругою 330-750 кВ чинить постійний та змінний вплив на біосферу. За характером дії та часовими рамками цей вплив доцільно класифікувати на дві основні групи:

1. Постійний (хронічний) вплив: Фактори, що діють безперервно протягом усього життєвого циклу об'єкта (електромагнітне випромінювання, відчуження земель, акустичний шум, візуальне забруднення ландшафту).

2. Аварійний (гострий) вплив: Фактори, що виникають раптово, мають стохастичний характер і пов'язані з виникненням НС та проведенням аварійно-відновлювальних робіт (АВР). Саме ця група факторів є предметом особливої уваги в рамках даного дослідження.

### 5.2.1. Електромагнітне та фізичне забруднення (Постійний вплив)

Вплив електромагнітних полів (ЕМП): МЛЄП надвисокої напруги є потужними лінійними джерелами електромагнітних полів промислової частоти (50 Гц). Напруженість електричного поля безпосередньо під проводами лінії 750 кВ може досягати значень 10-15 кВ/м, що значно перевищує природний електромагнітний фон Землі.

- Вплив на рослинний світ (флору): Наукові дослідження, проведені вітчизняними вченими [14], свідчать, що у деревних рослин, які потрапляють у зону інтенсивної дії коронного розряду, спостерігаються незворотні фізіологічні зміни. Відбувається пошкодження меристем верхівкових бруньок, пригнічення процесів фотосинтезу та зміни у клітинному метаболізмі. Це призводить до появи так званих "електричних суховершин", уповільнення росту та передчасного старіння дерев у смузі відводу.

- Вплив на тваринний світ (фауну): ЕМП чинить вплив на нейрофізіологію живих організмів. Найбільш чутливими до цього фактору є комахи-запилувачі, зокрема медоносні бджоли, які втрачають здатність до орієнтації в просторі та знижують продуктивність поблизу потужних ліній. Великі ссавці (косулі, кабани) інстинктивно уникають місць з високою напруженістю поля через виникнення наведених ємнісних струмів на поверхні тіла (шерсті), що викликає відчутний дискомфорт ("поколювання"). Це створює ефект бар'єру та призводить до фрагментації природних ареалів проживання популяцій диких тварин [21].

Шумове (акустичне) забруднення: Робота ліній напругою 750 кВ, особливо у вологу погоду (під час дощу, туману, випадання роси або паморозі), супроводжується характерним низькочастотним гудінням (100 Гц) та високочастотним потріскуванням. Це явище викликане коронним розрядом на поверхні проводів — іонізацією повітря навколо провідника. Рівень акустичного шуму може досягати 50-60 дБ на відстані 100 метрів від осі лінії,

що перевищує санітарні норми для нічного часу. Такий постійний шумовий фон створює фактор неспокою для фауни, змушуючи птахів та тварин покидати прилеглі території, що збіднює локальне біорізноманіття.

### **5.2.2. Вплив на земельні ресурси та ландшафти**

Відчуження земель: Будівництво та експлуатація МЛЕП вимагає вилучення з активного господарського користування значних площ земель під фізичне розміщення опор та організацію охоронних зон (ОЗ). Ширина охоронної зони для ПЛ 750 кВ становить 40 метрів по обидва боки від крайніх проводів. У межах цієї смуги суттєво обмежується господарська діяльність, забороняється вирощування високорослих культур, що змінює структуру землекористування та фрагментує сільськогосподарські угіддя.

Деградація ґрунтів під час АВР (Аварійний аспект): Цей аспект є критичним у контексті теми дипломної роботи та розроблених проектних пропозицій. Ліквідація наслідків НС, особливо згідно з запропонованою "логістикою останнього кілометра" (п. 3.2.1), передбачає інтенсивний рух важкої гусеничної та колісної техніки (армійські тягачі, автокрани вантажопідйомністю 50-100 т, бульдозери) по бездоріжжю.

- Механічне руйнування: Один прохід важкого гусеничного тягача по вологому ґрунту (луки, рілля, лісова підстилка) призводить до критичного ущільнення ґрунту на глибину до 0.5-1 метра. Це викликає руйнування структури гумусового горизонту, порушення аерації та повне знищення ґрунтової мезофауни (дощових черв'яків, комах), яка відповідає за родючість.

- Ерозійні процеси: Глибокі колії, залишені технікою на схилах, стають концентраторами поверхневого стоку дощових та талих вод. Це провокує розвиток лінійної водної ерозії та утворення ярів. На легких піщаних ґрунтах (Полісся) порушення рослинного покриву призводить до вітрової ерозії (дефляції) та утворення рухомих пісків.

### **5.2.3. Хімічне забруднення (Ризики розливу нафтопродуктів)**

Найбільшу екологічну небезпеку під час виникнення НС (особливо воєнного характеру або внаслідок терористичних актів) становить руйнування маслоснаповненого обладнання підстанцій. Слід зазначити, що одна фаза автотрансформатора класу напруги 750 кВ містить у своїй системі охолодження близько 60-80 тонн спеціального мінерального трансформаторного масла.

- Забруднення ґрунту та підземних вод: У разі механічного пошкодження баку (внаслідок вибуху, влучання уламків) відбувається миттєвий вилив великого об'єму масла на ґрунт. Нафтопродукти мають високу міграційну здатність і швидко просочуються вертикально вниз, досягаючи водоносних горизонтів. Екологічна небезпека полягає в тому, що всього один літр масла, потрапивши у воду, здатен зробити непридатною для пиття до 1 мільйона літрів води, надаючи їй стійкого специфічного запаху та присмаку нафтопродуктів. У ґрунті масло обволікає кореневу систему рослин, блокуючи доступ вологи та кисню, що призводить до повної деградації фітоценозу на забрудненій ділянці на десятиліття без можливості самовідновлення.

- Атмосферне забруднення: Масштабні пожежі трансформаторного масла, що часто супроводжують аварії такого типу, призводять до викиду в атмосферне повітря великої кількості токсичних продуктів горіння: сажі, оксидів вуглецю, діоксиду сірки, оксидів азоту, а також високотоксичних канцерогенних сполук — поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАВ), бенз(а)пірену та, за певних умов, діоксинів.

### **5.2.4. Вплив на орнітофауну**

Взаємодія популяцій птахів з об'єктами електромереж є складною двосторонньою екологічною проблемою, яка потребує уваги.

- Колізії (механічні зіткнення): Як зазначає у своїх дослідженнях Дульський А. О. [21], проводи МЛЕП, і особливо тонкі грозозахисні троси, є малопомітними для птахів у польоті. Ризик суттєво зростає в умовах поганої видимості (густий туман, опади, сутінки). Це призводить до травмування та масової загибелі великих птахів (лебеді, гуси, журавлі, дрозди) на шляхах їх сезонної міграції або добових перельотів між місцями годування та ночівлі.

- Електроураження: Хоча для ліній 750 кВ цей ризик є меншим через великі ізоляційні проміжки, він залишається актуальним для великих хижих птахів (орли, беркути, скопи), які використовують траверси опор як зручні присади для відпочинку та вистежування здобичі. Електричне замикання може статися через струмінь посліду ("стрімер"), що перекриває гірлянду ізоляторів, або при одночасному торканні крилами заземлених та струмовідних частин.

### **5.3. Методи мінімізації навантаження на довкілля в контексті сталого розвитку**

Реалізація принципів сталого розвитку в енергетиці вимагає не лише констатації екологічних ризиків, а й впровадження дієвих механізмів їх попередження. На основі проведеного аналізу впливу та з урахуванням інноваційних проектних пропозицій, розроблених у Розділі 3, пропонується комплексна система заходів щодо екологізації діяльності ОСП.

#### **5.3.1. Технічні методи мінімізації аварійного впливу**

1. Модернізація систем маслозахисту: Враховуючи катастрофічні наслідки розливів масла, впровадження надійних інженерних бар'єрів є безальтернативним.

- Що варто застосовувати: Обов'язкове обладнання всіх маслonaповнених апаратів (трансформаторів, реакторів) герметичними

залізобетонними маслоприймачами (чашами), засипаними шаром чистого промитого гравію фракції 30-50 мм. Гравій виконує функцію полум'ягасника, перешкоджаючи горінню масла у чаші. Маслоприймачі повинні бути з'єднані підземними трубопроводами з аварійними маслозбірними резервуарами (заглибленими ємностями), розрахованими на прийом 100% об'єму масла з найбільшого апарату. Це унеможливорює прямий контакт нафтопродуктів з відкритим ґрунтом навіть при повному руйнуванні обладнання.

- Чого варто уникати: Експлуатації застарілого обладнання з негерметичними ущільненнями, що призводять до хронічних мікровитоків масла ("капання"). Хоча такі витіки здаються незначними, вони роками накопичуються в ґрунті, створюючи зони локального забруднення.

2. Птахозахисні заходи (Bird Protection): Для збереження біорізноманіття необхідно впроваджувати пасивні засоби захисту.

- Що варто застосовувати: Встановлення спеціальних маркерів-девіаторів (кольорових куль, контрастних спіралей, флуоресцентних стрічок) на грозозахисних тросах у місцях перетину лініями водних перешкод та відомих шляхів міграції птахів. Це робить провід видимим здалеку та знижує ймовірність зіткнення на 80-90%. Встановлення спеціальних птахозагороджувачів на траверсах опор ("йоржів"), що фізично унеможливають посадку птахів безпосередньо над гірляндами ізоляторів, запобігаючи їх забрудненню послідом та ураженню струмом.

3. Екологічні аспекти запропонованих проектних рішень (з Розділу 3): Запропоновані в роботі технології мають не лише техніко-економічний, але й виразний екологічний ефект:

- Використання БПЛА (система ІСПМ): Масштабне впровадження дронів замість традиційного наземного автотранспорту для оглядів ліній дозволяє суттєво знизити споживання викопного палива та викиди  $CO_2$  (парникових газів) в атмосферу. Крім того, це зменшує механічне навантаження

на ґрунтовий покрив охоронних зон та знижує фактор турбування диких тварин. Це безпосередньо відповідає Цілям сталого розвитку ООН (Ціль 13: Боротьба зі зміною клімату).

- Мобільні опори аварійного резерву: Використання легких мобільних опор з сучасних композитних матеріалів або алюмінію замість важких залізобетонних конструкцій зменшує потребу у виробництві цементу (яке є вкрай енергоємним процесом з великими викидами вуглецю). Крім того, технологія їх монтажу (поверхневі плити, анкери) мінімізує порушення ґрунту, оскільки не потребує риття глибоких котлованів та бетонних робіт.

### **5.3.2. Організаційні методи та рекультивація**

Важливим елементом системи екологічного менеджменту є регламентація дій персоналу.

1. Рекультивація земель після завершення АВР: Пропонується впровадження обов'язкового внутрішнього стандарту рекультивації як завершального етапу будь-яких робіт із застосуванням важкої техніки.

- Технічний етап: Після завершення проїзду техніки та вивезення обладнання, всі утворені колії мають бути вирівняні, ґрунт розпушений для відновлення природної аерації та водопроникності.

- Біологічний етап: На пошкоджених ділянках проводиться відновлення трав'яного покриву шляхом підсіву насіння суміші багаторічних трав, характерних для даної місцевості (аборигенних видів), що запобігає розвитку ерозії та відновлює природний вигляд ландшафту.

2. Управління аварійними відходами: Необхідно організувати суворий роздільний збір відходів безпосередньо на місці ліквідації НС.

- Бій ізоляторів (кераміка, скло) та металобрухт (проводи, арматура) підлягають збору та передачі на переробку як вторинна сировина.

- Ґрунт, забруднений нафтопродуктами внаслідок аварійних витоків, класифікується як небезпечний відхід. Він підлягає обов'язковому вилученню (екскавації) та вивозу на спеціалізовані полігони для проведення біоремедіації або термічного знешкодження ліцензованими підрядниками. Засипання забрудненого ґрунту свіжою землею є неприпустимим порушенням природоохоронного законодавства [3].

3. Оптимізація логістики: Використання розроблених у п. 3.2.1 цифрових "Пакетів логістичних рішень" дозволяє заздалегідь прокладати маршрути руху техніки в обхід найбільш екологічно вразливих екосистем (торфових боліт, місць гніздування птахів, заповідних урочищ), мінімізуючи площу пошкодження ландшафту та вплив на біорізноманіття.

#### **5.4. Висновки**

1. Проведений у розділі системний аналіз підтверджує, що функціонування магістральних електричних мереж та, особливо, процеси ліквідації аварій на них є джерелом значних екологічних ризиків. Основними факторами впливу ідентифіковано електромагнітне забруднення, відчуження значних площ земель, ризики масштабних розливів трансформаторного масла та механічна деградація ґрунтів внаслідок руху важкої техніки.

2. Встановлено, що найбільш критичним та довготривалим екологічнимнаслідком воєнних та техногенних НС на підстанціях є хімічне забруднення ґрунтів та підземних вод нафтопродуктами, що вимагає безальтернативного впровадження на всіх об'єктах сучасних інженерних систем повного маслозахисту.

3. Обґрунтовано, що запропоновані у кваліфікаційній роботі інноваційні технічні рішення — перехід на предиктивний моніторинг за допомогою БПЛА, використання мобільних опор та стратегія ремонтів за станом (RCM) — мають виразний позитивний екологічний ефект. Вони

сприяють декарбонізації галузі (через зниження викидів від транспорту та раціональне використання матеріалів) та зменшенню безпосереднього антропогенного тиску на природні екосистеми.

4. Розроблений комплекс організаційно-технічних методів мінімізації впливу, що включає обов'язкову технічну та біологічну рекультивацію земель, встановлення птахозахисних пристроїв та належне поводження з небезпечними відходами, дозволяє забезпечити відповідність діяльності оператора системи передачі принципам сталого розвитку та вимогам чинного природоохоронного законодавства України [3].

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній (магістерській) роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу, що має стратегічне значення для забезпечення енергетичної безпеки держави — розроблено та науково обґрунтовано комплексний проект реінжинірингу системи управління безпекою магістральних ліній електропередач (МЛЕП). Метою роботи було створення дієвих, адаптивних механізмів для підвищення ефективності попередження виникнення системних аварій та забезпечення максимально швидкої ліквідації їх наслідків в умовах сучасних гібридних загроз.

За результатами проведеного дослідження, відповідно до поставлених у вступі завдань, сформульовано наступні висновки:

1. На основі глибокого системного аналізу поточного стану управління безпекою МЛЕП (на прикладі оператора системи передачі) виявлено, що існуюча модель управління, яка регламентована чинними нормативними документами [7, 10], є ефективною для стабільних умов мирного часу, проте демонструє критично низьку адаптивність до динамічних загроз воєнного часу та кліматичних змін. Ідентифіковано шість ключових системних проблем, серед яких найбільш критичними є: організаційна розсинхронізація дій диспетчерських та технічних служб у перші години НС [16]; переважно реактивний характер системи діагностики, що базується на рідкісних візуальних оглядах [12]; методологічна застарілість системи планово-попереджувальних ремонтів (ППР); неефективність логістики "останнього кілометра" при доставці важкої техніки на місце аварії [24].

2. У ході теоретичного дослідження проведено класифікацію та аналіз основних чинників ризику (техногенних, природних, антропогенних та воєнних). Доведено, що класична теорія надійності, на якій базуються існуючі технічні регламенти (ПУЕ, ПТЕ), не здатна адекватно реагувати на стохастичні

події (аномальні ожеледно-вітрові навантаження) та детерміновані антагоністичні загрози (цілеспрямовані атаки). Науково обґрунтовано необхідність фундаментального методологічного переходу від концепції "надійності" (спрямованої на уникнення відмови) до сучасної гібридної концепції "надійності-живучості" (Resilience) [25]. Визначено, що в нових умовах ключовим критерієм ефективності системи стає не час напрацювання на відмову, а швидкість відновлення функціональності після неминучого пошкодження.

3. На основі виявлених проблем та теоретичного підґрунтя розроблено комплексний проект модернізації системи управління безпекою (Розділ 3), який складається з двох стратегічних блоків:

- У сфері попередження (Превентивні заходи): Запропоновано впровадження Інтегрованої системи предиктивного моніторингу (ІСПМ), яка об'єднує дані з БПЛА (тепловізійний та візуальний контроль), супутникового моніторингу (InSAR) та IoT-датчиків у єдиному аналітичному центрі. Обґрунтовано перехід від календарних ремонтів до ризик-орієнтованої моделі обслуговування (RCM) [18], що дозволяє оптимізувати витрати та попередити відмови найбільш критичного обладнання. Розроблено інженерні заходи з підвищення фізичної стійкості (пасивний захист габіонами) та кібернетичної безпеки об'єктів відповідно до вимог Закону про критичну інфраструктуру [1].

- У сфері ліквідації (Заходи живучості): Для радикального скорочення часу аварійно-відновлювальних робіт (АВР) запропоновано впровадження технологій швидкого відновлення (комплекти уніфікованих мобільних опор), розробку проактивної логістичної моделі "Останній кілометр" на базі GIS-технологій та перехід до стратегії територіально розосередженого аварійного запасу, адаптованого до сценаріїв масштабних руйнувань.

4. Для вирішення критичної проблеми організаційної розсинхронізації та втрати керованості розроблено концепцію "Цифрового штабу АВР" — єдиного захищеного інформаційного простору, що в реальному часі інтегрує

диспетчерів, керівників АВБ, логістів та зовнішні служби (ДСНС, ВЦА). Впровадження цифрових протоколів взаємодії дозволяє усунути "комунікаційний хаос", забезпечити єдине розуміння ситуації всіма учасниками та автоматизувати процес залучення ресурсів.

5. З метою забезпечення безпеки персоналу розроблено та деталізовано специфічні заходи з охорони праці (Розділ 4), адаптовані до умов воєнного стану та застосування нових технологій. Сформульовано протоколи безпеки при роботі з БПЛА в охоронних зонах ліній, вимоги до безпечного монтажу мобільних опор на непідготовлених ґрунтах, а також алгоритми дій персоналу в умовах мінної небезпеки та загрози повторних обстрілів. Розрахунковим шляхом доведено, що для захисту персоналу від наведеної напруги на лініях 750 кВ при використанні автокранів необхідно застосовувати групові тимчасові заземлювачі, що забезпечують опір розтікання не більше 50м [5].

6. Проведено комплексний аналіз впливу МЛЕП та процесів ліквідації аварій на навколишнє середовище (Розділ 5). Ідентифіковано критичні екологічні ризики, пов'язані з можливими розливами трансформаторного масла та механічною деградацією ґрунтів важкою гусеничною технікою. Розроблено конкретні інженерні та організаційні заходи з мінімізації шкоди довкіллю, зокрема: модернізація систем маслозахисту підстанцій (герметичні маслоприймачі), впровадження обов'язкових протоколів технічної та біологічної рекультивациі земель (відновлення гумусового шару, посів трав) після завершення АВР, а також систему управління аварійними відходами відповідно до природоохоронного законодавства [3].

Загальний підсумок: Результати роботи підтверджують, що реалізація запропонованого комплексу організаційно-технічних рішень дозволить трансформувати існуючу систему експлуатації МЛЕП у сучасну, стійку та адаптивну систему. Це забезпечить суттєве підвищення надійності енергопостачання споживачів, мінімізацію економічних збитків від недоотпуску

електроенергії та гарантування енергетичної безпеки держави в умовах перманентних зовнішніх загроз.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про критичну інфраструктуру : Закон України від 16.11.2021 № 1882-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20>
2. Кодекс цивільного захисту України : Закон України від 02.10.2012 № 5403-VI. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17>
3. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 25.06.1991 № 1264-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12>
4. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>
5. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Вид. 3-тє, перероб. і доп. — Харків : Форт, 2017. — 760 с.
6. НПАОП 40.1-1.01-97. Правила безпечної експлуатації електроустановок. Затв. Держнаглядохоронпраці України 09.01.1998 № 4.
7. СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. Норми випробування електрообладнання. Київ: Мінпаливенерго України, 2007. — 260 с.
8. ДСТУ EN 50110-1:2014. Експлуатація електричних установок (EN 50110-1:2013, IDT).
9. ДСТУ ISO 31000:2018. Менеджмент ризиків. Принципи та настанови (ISO 31000:2018, IDT). — К.: УкрНДНЦ, 2019.
10. Кодекс систем передачі. Затв. Постановою НКРЕКП від 14.03.2018 № 309.
11. Володарський Є. Т., Козенков О. Д. Надійність, ризик та безпека технічних систем : навч. посіб. — Київ : НТУУ «КПІ», 2012. — 188 с.
12. Кузнецов В. Г., Кидиба В. П. Технічна діагностика та обслуговування за станом електрообладнання. — Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2011. — 260 с.

13. Лежнюк П. Д., Кулик В. В. Управління режимами електроенергетичних систем в умовах надзвичайних ситуацій. — Вінниця : ВНТУ, 2010. — 162 с.
14. Мазуренко Л. І. Екологія в електроенергетиці : навч. посіб. — Київ : НТУУ «КПІ», 2014. — 248 с.
15. Стійкість та надійність електроенергетичних систем / О. В. Кириленко, О. Г. Лук'яненко, С. О. Блажкевич та ін. — К. : Інститут електродинаміки НАН України, 2015. — 312 с.
16. Тугай Ю. І., Спінул В. О. Управління ризиками при експлуатації об'єктів електроенергетики. — Київ : КНУБА, 2013. — 204 с.
17. CIGRE TB 642. Overhead line design guidelines for mitigation of severe weather events. — Paris: CIGRE, 2016. — 150 p.
18. Moubray, J. Reliability-Centered Maintenance (RCM II). 2nd ed. — Industrial Press, 1997. — 424 p.
19. Блінов І. В., Носачов А. А. Підвищення живучості систем електропостачання об'єктів критичної інфраструктури // Системи озброєння і військова техніка. — 2019. — № 1 (57). — С. 98-105.
20. Бондаренко В. Є., Гречко О. М. Аналіз ризиків відмов магістральних ліній електропередач внаслідок кліматичних впливів // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. — 2020. — № 2. — С. 25-31.
21. Дульський А. О., Мазуренко Л. І. Оцінка впливу електромагнітних полів ліній електропередачі на біоту // Технічна електродинаміка. — 2018. — № 4. — С. 45-51.
22. Жежеленко І. В., Ширіна Г. В. Методи оцінки надійності та живучості електроенергетичних систем в умовах цілеспрямованих атак // Енергетика та електрифікація. — 2022. — № 3. — С. 15-22.

23. Каліновський А. О. Використання безпілотних літальних апаратів для моніторингу стану повітряних ліній електропередач // Вісник інженерної академії України. — 2019. — № 1. — С. 120-124.
24. Лесовой А. Н., Щербак І. В. Оптимізація логістики аварійно-відновлювальних робіт в електричних мережах // Наукові праці Донецького національного технічного університету. — 2017. — № 1 (30). — С. 56-63.
25. Panteli, M., Trakas, D. N., Mancarella, P. Power System Resilience Assessment: Hardening, Islanding, and Restoration Strategies // IEEE Transactions on Power Systems. — 2017. — Vol. 32, No. 5. — pp. 3602-3612.
26. Офіційний сайт НЕК «Укренерго». URL: <https://ua.energy>
27. Офіційний сайт Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС). URL: <https://dsns.gov.ua>
28. Аналіз стійкості енергосистем в умовах воєнних дій: досвід України. [Електронний ресурс] // Energy Association "UKRAINE". — 2023.