

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____ Петро ПЛЄШКОВ
“ ____ ” _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:
«Дослідження впливу грозових розрядів на надійність
електропостачання споживачів»
«Research on the impact of lightning strikes on the
reliability of power supply to consumers»

Виконав здобувач вищої освіти
II курсу групи ЕЕ-24М
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»,
освітньо-професійної програми
«Електротехнічні системи
електроспоживання»
_____ Іван БЛОКОНЬ
« ____ » _____ 2025 р.

Керівник роботи
доцент, канд.техн.наук
_____ Ігор ПЕРЕВЕРЗЄВ
« ____ » _____ 2025 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

Петро ПЛЄШКОВ

«_____» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Білоконь Івана Андрійовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Дослідження впливу грозових розрядів на надійність електропостачання споживачів

Research on the impact of lightning strikes on the reliability of power supply to consumers

2. Керівник роботи (проекту) Переверзєв Ігор Олексійович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 02.12.2025р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи

1. Питання надійності електропостачання споживачів в умовах грозових впливів.
2. Методика визначення грозостійкості ліній електропередачі. 3. Розрахунок питомої грозостійкості ЛЕП 35-220 кВ за залежністю від кута тросового захисту. 4. Охорона праці.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>доц., к.т.н. І. Савеленко</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Питання надійності електропостачання споживачів в умовах грозових впливів</i>	<i>06.10.2025</i>	
2	<i>Методика визначення грозостійкості ліній електропередачі</i>	<i>20.10.2025</i>	
3	<i>Розрахунок питомої грозостійкості ЛЕП 35-220 кВ за залежністю від кута тросового захисту</i>	<i>01.11.2025</i>	
4	<i>Охорона праці</i>	<i>17.11.2025</i>	
5	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	<i>27.11.2025</i>	
6	<i>Оформлення презентаційної частини роботи</i>	<i>02.12.2025</i>	

Дата видачі завдання

« ____ » _____ 2025 р.

Підпис керівника _____

Ігор ПЕРЕВЕРЗЄВ

Завдання прийнято до виконання

« ____ » _____ 2025 р.

Підпис здобувача _____

Іван БІЛОКОНЬ

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 92 с.; 13 рис.; 9 табл.; 17 джерел, 1 додаток

Білоконь І.А. Дослідження впливу грозових розрядів на надійність електропостачання споживачів. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». Центральноукраїнський національний технічний університет. Кропивницький, 2025 р.

Метою роботи є дослідження надійності електропостачання споживачів у умовах дії грозових розрядів та визначенню шляхів підвищення грозостійкості повітряних ліній електропередачі. У роботі розглянуто основні вимоги до систем електропостачання промислових підприємств, статистичні показники їх надійності та наведено огляд сучасних і перспективних методів захисту ЛЕП від блискавок, включаючи активні й пасивні системи блискавкозахисту, обмежувачі перенапруг, удосконалені системи заземлення та адаптивні підходи.

Представлено методику визначення грозостійкості ліній електропередачі, що ґрунтується на аналізі фізичних властивостей блискавки, закономірностей її взаємодії з елементами ЛЕП та схемах тросового захисту. Детально досліджено ймовірність проникнення блискавки через тросовий захист залежно від величини захисного кута та просторового положення гірлянди ізоляторів на траверсі опори.

Отримані результати дозволяють сформулювати практичні рекомендації щодо підвищення стійкості повітряних ліній до грозових впливів та забезпечення надійного електропостачання споживачів.

Ключові слова: система електропостачання, блискавкозахист, комутаційні перенапруги, обмежувач перенапруг нелінійний, електрична дуга, грозостійкість.

SUMMARY

Qualification work: 92 p.; 13 Fig.; 9 tables; 17 sources

Bilokon Ivan. Research on the impact of lightning strikes on the reliability of power supply to consumers. 141 "Electric power, electrical engineering and electromechanics" EPP, "Electrotechnical Systems of Power Consumption". Central Ukrainian National Technical University. Kropyvnytskyi, 2025.

The aim of the work is to study the reliability of power supply to consumers under the influence of lightning discharges and to determine ways to increase the lightning resistance of overhead power lines. The work considers the basic requirements for power supply systems of industrial enterprises, statistical indicators of their reliability and provides an overview of modern and promising methods of protecting power lines from lightning, including active and passive lightning protection systems, surge arresters, improved grounding systems and adaptive approaches.

A methodology for determining the lightning resistance of power lines is presented, which is based on the analysis of the physical properties of lightning, the patterns of its interaction with power line elements and cable protection schemes. The probability of lightning penetration through cable protection depending on the magnitude of the protective angle and the spatial position of the garland of insulators on the support traverse is studied in detail.

The results obtained allow us to formulate practical recommendations for increasing the resistance of overhead lines to lightning effects and ensuring reliable power supply to consumers.

Key words: power supply system, lightning protection, switching surges, nonlinear surge arrester, electric arc, lightning resistance.

ЗМІСТ

	ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	6
	ВСТУП	7
1.	ПИТАННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ СПОЖИВАЧІВ В УМОВАХ ГРОЗОВИХ ВПЛИВІВ	9
1.1.	Головні вимоги, які висуваються до систем електропостачання для промислових підприємств	9
1.2.	Статистичні характеристики надійності електропостачання промислових підприємств	12
1.3.	Огляд сучасних та перспективних методів підвищення грозостійкості ЛЕП	15
1.3.1.	Активні та гібридні системи блискавкозахисту	15
1.3.2.	Розвинені засоби обмеження перенапруг	18
1.3.3.	Удосконалення та оптимізація системи заземлення	21
1.3.4.	Пасивні конструктивні методи	24
1.3.5.	Адаптивні та керовані системи	26
1.3.6.	Порівняльний аналіз сучасних та перспективних методів	28
2.	МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ГРОЗОСТІЙКОСТІ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ	33
2.1.	Властивості блискавки	33
2.2.	Захист ліній електропередачі від грози	39
2.2.1.	Грозостійкість ЛЕП без тросового захисту	39
2.2.2.	Грозостійкість повітряних ліній електропередач із блискавкозахисними тросами	44
2.3.	Вплив зменшення захисного кута на ймовірність проникнення блискавки через тросовий захист	52
2.4.	Вплив переміщення ізоляторної гірлянди по траверсі на ймовірність прориву блискавки через тросовий захист	56
3.	РОЗРАХУНОК ПИТОМОЇ ГРОЗОСТІЙКОСТІ ЛЕП 35-220 кВ ЗА ЗАЛЕЖНОСТЮ ВІД КУТА ТРОСОВОГО ЗАХИСТУ	59
3.1.	Підсумки обчислень ймовірності пошкодження фазного проводу залежно від висоти підвіски троса	59
3.2.	Підсумки обчислень ймовірності виникнення пошкодження фазного проводу за умови зміни розташування гірлянди ізоляторів на траверсі	67
3.3.	Підсумки обчислень ймовірності зворотного перекриття лінійної ізоляції	75
	ВИСНОВКИ	83
	СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	84
	ДОДАТКИ	86
A	Охорона праці	87

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- АД – асинхронний двигун;
- АПВ – автоматичне повторне включення;
- ЕП – електричні приймачі;
- КЗ – коротке замикання;
- КЛ – кабельна лінія;
- КП – компенсуючі пристрої;
- КРП – компенсація реактивної потужності;
- ЛЕП – лінія електропередачі;
- ОЗЗ – однофазні замикання на землю;
- ОПН – обмежувач перенапруги;
- ПЛ – повітряна лінія;
- РДІ – розрядники довгої іскри;
- СЕП – система електропостачання;
- СД – синхронний двигун;
- СОР – струмообмежуючі реактори.

ВСТУП

Надійність електропостачання є одним з ключових чинників стабільної роботи промислових, енергетичних та побутових електротехнічних комплексів. Сучасні електроенергетичні системи функціонують в умовах зростаючих навантажень, високих вимог до якості електроенергії та необхідності безперервного живлення відповідальних об'єктів. Особливу загрозу для стабільності електропостачання становлять грозові розряди, які здатні спричинити аварійні відключення повітряних ліній електропередач, пошкодження обладнання та тривалі перерви в електропостачанні споживачів.

Удари блискавок у лінії електропередач є однією з основних причин їх аварійних відключень у грозовий період. Виникнення таких порушень призводить до втрати стійкості роботи технологічних апаратів, зниження рівня електробезпеки та появи додаткових економічних збитків. Для підтримання нормальної роботи електроприймачів як у штатних, так і післяаварійних режимах необхідно мінімізувати кількість і тривалість перерв в електропостачанні, особливо тих, що спричинені атмосферними перенапругами. Водночас важливим є забезпечення відповідності показників якості електроенергії чинним нормам ДСТУ, що гарантує ефективну та безпечну роботу електротехнічного обладнання.

Одним із ключових напрямів підвищення загальної надійності системи електропостачання є зменшення збитків, викликаних грозовими відключеннями ЛЕП, шляхом підвищення їх грозостійкості. Основним показником, що характеризує рівень грозостійкості повітряної лінії, є число грозових відключень, віднесене до 100 км довжини лінії та 100 годин грозової активності. Цей параметр дозволяє оцінити ефективність існуючих заходів блискавкозахисту та визначити потребу в удосконаленні методів технічного захисту.

В Україні та за кордоном постійно проводяться дослідження у сфері підвищення ефективності захисту ЛЕП від грозових перенапруг. Розробляються та впроваджуються нові методики оцінювання зон захисту, оптимізуються схеми розміщення грозозахисних тросів і заземлювальних пристроїв, створюються

сучасні високонадійні обмежувачі перенапруг. На основі статистичних даних, математичного моделювання та експериментальних досліджень формуються рекомендації щодо підвищення рівня захищеності енергооб'єктів від атмосферних перенапруг.

Таким чином, питання забезпечення грозостійкості повітряних ліній електропередачі залишається надзвичайно актуальним, оскільки воно безпосередньо впливає на безперебійну та якісну роботу електроенергетичної системи. У даній роботі розглядаються актуальні методи підвищення стійкості ЛЕП до грозових впливів, особливості моделювання процесів виникнення перенапруг та шляхи удосконалення заходів блискавкозахисту для підвищення надійності електропостачання споживачів.

1. ПИТАННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ СПОЖИВАЧІВ В УМОВАХ ГРОЗОВИХ ВПЛИВІВ

1.1. Головні вимоги, які висуваються до систем електропостачання для промислових підприємств

Система електропостачання сучасного промислового підприємства має відповідати таким *основоположним вимогам*:

- економічна ефективність;
- високий рівень надійності;
- безпечність;
- зручність експлуатації для персоналу;
- гарантування необхідної якості електроенергії (включаючи показники напруги, стабільність частоти тощо);
- потрібна гнучкість, що дозволяє нарощувати потужності під час розвитку підприємства.

Також мають значення *додаткові вимоги*, які стосуються систем електропостачання:

- електроприймачі з різко змінними, циклічно повторюваними імпульсними навантаженнями;
- електроприймачі безперервного циклу, для яких потрібна гарантована безперебійність живлення в усіх режимах роботи електропостачальної системи.

Під час модернізації чи проектування електропостачальних систем беруть до уваги цілу низку чинників, зокрема:

- розмір споживаної потужності;
- категорія надійності живлення для окремих електроприймачів;
- графіки навантажень потужних споживачів;
- особливості навантажень;
- розташування електричних навантажень згідно генерального плану підприємства;

- кількість і потужність підстанцій та інших пунктів приймання електроенергії;
- робоча напруга споживачів та інші чинники.

Одне з ключових питань промислової енергетики — це енергозбереження, що прямо залежить від величини електровтрат у всіх частинах системи електропостачання та самих електроприймачах. До основних способів мінімізації втрат електроенергії в промисловості можна віднести такі:

- 1) раціональне проектування та реконструкція електропостачальної системи, що передбачає обґрунтований вибір напруг, кількості і потужності трансформаторів, оптимальну кількість ступенів трансформації, розміщення підстанцій, побудову схеми електропостачання, а також впровадження компенсації реактивної потужності тощо;
- 2) зменшення електричних втрат у вже функціонуючих системах електропостачання, а саме: оптимізація режимів електроспоживання, налаштування напруги, скорочення холостого режиму роботи електроприймачів, модернізація діючого обладнання та впровадження більш досконаlih, енергоефективних і надійних технічних рішень, обладнання, економічна організація експлуатації силових трансформаторів, заміна асинхронних електродвигунів (АД) на синхронні (СД), якщо це доцільно, автоматизація освітлення протягом добового циклу, підвищення стандартів якості електроенергії тощо;
- 3) впровадження нормування електроспоживання, розроблення обґрунтованих норм питомих витрат енергії на виробництво одиниці продукції; впровадження нормування електроспоживання передбачає наявність ефективних систем обліку й контролю енергоспоживання на підприємстві;
- 4) організаційно-технічні заходи, які розробляються окремо для кожного підприємства з урахуванням його особливостей.

Одним із ефективних методів скорочення втрат електроенергії

виступає компенсація реактивної потужності (КРП) споживачів шляхом використання локальних джерел реактивної енергії (ДРМ). При цьому дуже важливим є правильний вибір типу, потужності, місця встановлення та способу автоматизації ДРМ.

Зменшити споживання реактивної потужності, а, відповідно, й знизити втрати активної енергії можливо двома методами: без використання та із застосуванням пристроїв компенсації (КП).

До *першого методу* (без використання КП) належать: організація технологічного процесу, який забезпечує покращення енергетичних режимів роботи обладнання та підвищує коефіцієнт потужності $\cos \varphi$; заміна недостатньо завантажених електродвигунів на двигуни меншої потужності, переведення статорних обмоток АД з трикутника на зірку для двигунів з напругою до 1 кВ, якщо їх завантаження менше 40%, підвищення якості ремонту двигунів з дотриманням номінальних параметрів, а також правильний вибір електродвигунів за потужністю і типом.

До *другого методу* (з використанням КП) відноситься застосування як компенсуючих пристроїв батарей конденсаторів та СД, а також сучасних статичних тиристорних компенсаторів реактивної потужності. Водночас для потужних споживачів із швидкозмінним навантаженням існуюча методика добору таких компенсаторів не враховує вимоги ДЕСТ щодо величини флікера (суб'єктивна оцінка людиною змін яскравості штучних джерел освітлення, спричинених коливаннями напруги у мережі, яка забезпечує живлення цих світильників).

Питання енергозбереження включає також забезпечення більшої надійності електропостачання, оскільки несподівані перерви у подачі електроенергії можуть викликати значні виробничі збитки. Проте підвищення надійності зазвичай веде до зростання вартості електропостачальної системи. Тож найчастіше визначають оптимальний рівень надійності та обирають структуру системи електропостачання, яка відповідає цьому рівню.

Ще однією важливою проблемою стає особлива актуальність питання забезпечення необхідної якості електроенергії. Незадовільна якість електроенергії в першу чергу призводить до зростання втрат електроенергії як у електроприймачах, так і у самій мережі.

Для забезпечення стабільної експлуатації відповідальних електроспоживачів у стандартних та післяаварійних режимах потрібно:

- максимально зменшити кількість і тривалість збоїв у їх енергопостачанні;
- гарантувати належну якість електроенергії, що забезпечить стійку роботу відповідальних технологічних пристроїв під час відхилень у режимі електропостачання.

В результаті перелічені завдання можна охарактеризувати як внутрішній аспект — підтримка якісного постачання електроенергії, для чого використовують сучасні компенсатори реактивної потужності, та зовнішній — забезпечення стабільної роботи електроенергетичної системи, тобто безперервне живлення електроприймачів. Одним із ключових факторів забезпечення надійності системи виступає стійкість до грозових впливів ліній електропередач.

1.2. Статистичні характеристики надійності електропостачання промислових підприємств

Надійність електропостачальної системи визначається надійністю її окремих компонентів (генеруючих агрегатів, повітряних ліній, комутаційних пристроїв, захисного та автоматичного обладнання тощо), її схемою (рівнем резервування) та режимом роботи (запасами динамічної і статичної стійкості), а також життєздатністю, тобто здатністю системи витримати аварії без катастрофічних наслідків. Навіть за високої якості елементів та їх правильної експлуатації відмови апаратури в роботі неминучі. Виникнення відмов пов'язане з низкою об'єктивних випадкових чинників і, в першу чергу, з тим, що обладнання при експлуатації може

потрапити під вплив непередбачених чинників, урахування яких потребувало б необґрунтовано великих резервів. Надійність залежно від мети можна оцінювати різними показниками. Для систем електропостачання як основні показники надійності прийнято використовувати кількість і тривалість порушень у нормальному режимі електропостачання. Кількісні оцінки рівня надійності дозволяють визначити економічну ефективність системи електропостачання.

Оптимальна надійність електроенергетичних установок встановлюється шляхом аналізу втрат, завданих споживачам перервою постачання електроенергії, а також збитків, пов'язаних із аварійними ремонтами, та витрат, необхідних для підвищення рівня надійності. Електропостачання має працювати так, щоб навіть при обмеженій надійності складових частин забезпечувалась оптимальна надійність загальної системи. Вимоги до надійності енергетичної системи переважно залежать від виробничої технології, тому ефективні рішення щодо забезпечення потрібної надійності можуть бути отримані лише при комплексному розгляді питань технологічної схеми виробництва разом із схемою електропостачання. Відмови елементів електропостачальних систем обумовлені багатьма випадковими факторами, що дозволяє розглядати їх як випадкові події. Це й підкреслює необхідність проводити аналіз надійності із застосуванням теорії ймовірностей.

Зважаючи на те, що електротехнічний комплекс включає в себе велику кількість n - складових, вихід з ладу системи можливий лише у випадку, коли вийдуть з ладу n -елементів, які обчислюються за формулою:

$$q = q_1 \cdot q_2 \cdots q_n \quad (1.1)$$

А ймовірність безвідмовної роботи:

$$p = 1 - q = 1 - q_1 \cdot q_2 \cdots q_n \quad (1.2)$$

Для повітряних ліній електропередачі головна характеристика — це інтенсивність відмов (кількість аварійних відключень ліній протягом року). Відсоток аварійних вимикань ЛЕП через грозову активність атмосфери (грозостійкість ЛЕП, поодинокий нестационарний потік відмов) становить від 10 до 35% від сукупної кількості аварійних вимикань. Щоб порівняти грозостійкість ліній різної протяжності у місцевостях із різною грозовою частотою, проводять розрахунки так званої питомої грозостійкості ліній довжиною 100 км при кількості грозових годин у межах року — 100. Питома кількість перерв у електропостачанні через грозову активність розраховується як добуток питомої грозостійкості на ймовірність невдалої спроби АПВ ($N_{\text{відкл.н}}$) Обчислення параметра потоку стійких відмов $N_{\text{відкл}}$ для ліній протяжністю l км, здійснюється згідно з формулою:

$$N_{\text{відкл}}(t) = \frac{N_{\text{відкл.н}} \cdot L_{\text{ЛЕП}} \cdot n_{\text{гр}} \cdot t}{100 \cdot 100 \cdot t_{\text{гр.с}}}, \quad (1.3)$$

де $L_{\text{ЛЕП}}$ - довжина ЛЕП (км), а $n_{\text{гр}}$ - кількість годин гроз у році на ділянці проходження ЛЕП, $N_{\text{відкл}}(t)$ - кількість змушених грозових перерв електропостачання протягом t (годин), $t_{\text{гр.с}}$ - період (у годинах), що відповідає тривалості грозового сезону. Під час обчислення кількості перерв електропостачання за рік необхідно враховувати $t = t_{\text{гр}}$

Таблиця 1.1. Показники надійності трансформаторного обладнання та ліній електропередачі

Лінії повітряного типу на 100 км. АПВ при опорах із металу або залізобетону				
Тип елемента та номінальна напруга, кВ	Інтенсивність відмов $N_{відкл.л}$, 1/рік	Тривалість відновлювальних робіт, $T_{ср}$, рік	Частота планових ремонтів, A , 1/рік	Час виконання планового ремонту, $T_{пл}$, рік
220	0,7	16	6	8
110	1,0	14	5	8
35	2,0	12	5	8
10	2,0	5	4	8

Варто зазначити, що в наукових джерелах зустрічаються різні підходи до розрахунків кількості грозових відключень електропостачання, які можуть відчутно різнитися, подекуди навіть на порядок. Водночас, у межах однієї методики відносні зміни числа грозових перерв електропостачання визначаються цілком коректно.

1.3. Огляд сучасних та перспективних методів підвищення грозостійкості ЛЕП

1.3.1. Активні та гібридні системи блискавкозахисту

Активні блискавковідводи (ранньострумові розрядники)

Стрімкий розвиток енергетичних систем та підвищення потужності ЛЕП зумовили потребу у застосуванні нових підходів до грозозахисту. Класичні методи, на кшталт грозозахисних тросів, не завжди гарантують належний рівень захисту, особливо для сучасних, високо-напружених або важкодоступних ліній. Тому в останні роки зросла увага до активних блискавковідводів, які суттєво підвищують імовірність перехоплення розряду у потрібній точці.

Активний блискавковідвід (ранньострумовий розрядник) являє собою пристрій, котрий на етапі формування лідеру блискавки в хмарі створює іонізований канал зустрічного напрямку. Це досягається шляхом генерації високовольтного імпульсу у момент наближення природного розряду, що

ініціює "зумисний" зустрічний лідер. Внаслідок цього блискавка «перехоплюється» та відводиться у спеціальну точку — або грозотрос, або окремий струмопровідний елемент, захищаючи основне обладнання ЛЕП від пошкодження.

Основна відмінність від класичного блискавковідводу — «активне втручання» у фазу зародження каналу блискавки, що істотно підвищує ймовірність відведення енергії саме в бажану точку.

Типова конструкція активного блискавковідводу передбачає наявність високовольтного імпульсного генератора, іонізаційної камери, металевого випромінювача та автоматизованого механізму ввімкнення. Розташування — над підстанціями, лініями або окремими стратегічними об'єктами. Моніторинг зміни напруги в атмосфері дозволяє пристрою спрацьовувати лише за наявності реальної загрози, що економить ресурс обладнання. Останнім часом з'являються компактні версії для використання навіть у важкодоступних місцях (гори, великі річки тощо).

Переваги:

- Значне зниження кількості «промахів» блискавки; підвищення грозостійкості системи в цілому.
- Можливість ефективного захисту високих опор та підстанцій, для яких класичний трос недостатній.
- Активне скеровування розряду мінімізує ураження ізоляторів, вимикачів, трансформаторів.
- Сучасні моделі дозволяють працювати в автономному (енергонезалежному) режимі, мають багаторічний ресурс експлуатації.

Недоліки:

- Вища вартість у порівнянні з класичними системами.
- Потреба у періодичному обслуговуванні, особливо в зонах великої забрудненості чи агресивного середовища.
- Необхідність робіт із встановлення та настройки автоматики.

- Доступність сертифікованих моделей залежить від країни-виробника та національних вимог.

У ЄС та Китаї активні блискавковідводи активно впроваджуються на стратегічних енергетичних об'єктах з початку 2000-х років. За даними виробників та незалежних випробувань, відсоток аварійних відключень через грозу знижується більш ніж у 2–3 рази. Вітчизняна практика ще обмежена, проте окремі випробування на підстанціях Західної України та спеціалізованих ЛЕП підтвердили ефективність. Є наявність патентованих українських рішень — наприклад, адаптовані пристрої ХАВ «Іскра» (м. Харків).

Рекомендовано для: висотних та віддалених опор, підстанцій, де критичним є гарантія безвідмовності. Широке впровадження можливе за умови здешевлення технологій, а також нормативної адаптації. Надалі — потенціал застосування в умовах кліматичних ризиків і імпортозаміщення.

Гібридні системи грозозахисту (трос + ОПН)

Комплексний характер блискавкових уражень змушує проектувальників поєднувати різні технічні засоби. На лініях середньої та високої напруги класичні троси іноді не запобігають виникненню перенапруг або зворотних перекидів. Тому виникла ідея поєднати «пасивний» захист (трос) з активними обмежувачами перенапруг (ОПН), що суттєво підвищує рівень безпеки та надійності.

Класичний трос монтується над лінією й забезпечує перехоплення основної частини блискавки, мінімізуючи ймовірність прямого влучання у фазні проводи. Додатково, на кожній або окремих опорах встановлюються ОПН — пристрої, які миттєво обмежують амплітуду небезпечних перенапруг, що можуть виникнути навіть у разі часткового проходження грозових струмів крізь ізоляцію. Поєднання двох систем формує «подвійну лінію оборони» від грозових ушкоджень.

Переваги:

- Дуже висока ефективність відключень ЛЕП через грозу (сучасна статистика — до 90% зниження випадків аварійних ситуацій).
- Гнучкість — можливо добирати комбінації, змінювати схему в залежності від особливостей ділянки лінії та місцевості.
- Підвищення терміну служби апаратури: ізоляторів, вимикачів.

Недоліки:

- Вартість встановлення та обслуговування більша, ніж при застосуванні лише тросу чи лише ОПН.
- Потрібен ретельний електротехнічний розрахунок взаємодії троса й обмежувачів для запобігання паразитним явищам (індуктивний вплив, підземні струми).
- Складніше організувати діагностику компонентів, монтаж у гірській чи болотистій місцевості.

Гібридні системи стандарт для ЛЕП 110-330 кВ у багатьох країнах Європи, США, Японії. В Україні широко застосовуються на нових підстанціях та реконструйованих ділянках «Укренерго» й обленерго. Програма модернізації магістральних ЛЕП майже завжди передбачає встановлення ОПН поруч із класичними тросами.

Очевидні переваги гібридної системи дають підстави вважати її одним із найбільш оптимальних рішень для більшості мереж електропередач майбутнього, особливо в умовах підвищеної частоти грозових явищ, кліматичних змін і зростання протяжності мереж.

1.3.2. Розвинені засоби обмеження перенапруг

Струмообмежуючі реактори (СОР)

Досвід експлуатації ЛЕП у різних країнах показує, що одним з основних чинників, здатних пошкодити ізоляцію, є грозові перенапруги, що виникають не лише через прямі влучання блискавки, але й унаслідок індуктивних та ємнісних впливів. Класичні конструкції ЛЕП часто не гарантують допустимої величини перенапруги на ізоляторах, особливо на лініях з довгими прольотами, високим імпульсним опором заземлення й

розташованих у несприятливих географічних умовах. Для вирішення проблеми на конкретних ділянках дедалі частіше запроваджуються струмообмежуючі реактори.

Струмообмежуючий реактор встановлюється в ланцюг заземлення опори. Під час проходження грозового розряду його індуктивний опір різко підвищується через специфічну (нелінійну) вольт-амперну характеристику. Збільшуючись, опір обмежує максимальний струм, що потрапляє у ґрунт через опору під час грози. Відповідно, потенціал опори знижується, суттєво зменшується імовірність зворотного перекриття ізоляції або утворення стійкої електричної дуги.

Переваги:

- Ефективне зниження перенапруг на ізоляторах, що суттєво подовжує їхній термін служби.
- Особливо корисно для ЛЕП, що мають високий імпульсний опір заземлення (скелясті ґрунти, піски, гори).
- Зменшення ризику багаторазових відключень внаслідок грозових явищ і «шлейфових» пошкоджень.

Недоліки:

- Досить складна настройка індуктивних параметрів — потребує докладних електромагнітних розрахунків щодо кожної ділянки лінії.
- Утруднення технічного обслуговування внаслідок важкодоступності на протяжних ЛЕП.
- Вартість реактора може бути високою, особливо при великій кількості точок встановлення.

В країнах Західної Європи й Північної Америки такі пристрої використовують переважно на магістральних мережах, які проходять через території з поганими ґрунтами. В Україні проекти з впровадження СОР вперше з'явилися на ділянках Західного регіону, де типові гірські й кам'янисті умови. Згідно з відгуками енергетичних компаній, кількість оперативних відключень там скоротилася в 1,5–2 рази.

Мультимегавольтні розрядники довгої іскри (РДІ)

Розрядники довгої іскри — це одна з новітніх технологій захисту ЛЕП від тривалих і потужних грозових імпульсів. Вони дають змогу контролювати шляхи проходження блискавки та знижують ризик утворення стійкої дуги на ділянках із підвищеною електричною напруженістю.

На відміну від класичних іскрових або вентиляльних розрядників, РДІ створює особливо довгий канал штучної іскри (до кількох метрів), що дає змогу ефективно відводити надлишкову енергію грозового розряду в безпечному напрямку. Спотворення електричного поля й перерозподіл напруги зменшують ймовірність утворення тривалої дуги між фазним проводом і опорою, тим самим підвищується захист ізоляторів та інших ключових елементів. Конструкція складається з металевих електродів, ізоляційних опор і спеціальних дистанційників, що забезпечують стабільну роботу навіть при складних погодних умовах.

Переваги:

- Практично повністю усувають аварійні відключення ЛЕП внаслідок грозових перекриттів.
- Зберігають ресурс вимикачів, трансформаторів, ізоляторів.
- Дають змогу пристосовувати систему під специфічні умови експлуатації (особливо довгі прольоти, складні траси).

Недоліки:

- Наявність значного фронту робіт по проектуванню й монтажу.
- Вартість оснащення однієї ділянки може бути чималою для старих ЛЕП.
- Потреба у постійному моніторингу технічного стану та своєчасній заміні окремих елементів.

В Японії, Німеччині та ряді скандинавських країн РДІ стали стандартом для особливо важких ділянок, що ведуть до підстанцій або мають велику протяжність над відкритою місцевістю. В Україні такі розрядники

встановлювали, зокрема, на підходах до підстанцій великих промислових регіонів (Дніпро, Кривий Ріг, Запоріжжя). За результатами моніторингу, це дозволило скоротити кількість збоїв на підстанціях удвічі.

Збільшення напруги ЛЕП і зміни клімату стимулюють подальше вдосконалення конструкцій РДІ, їх впровадження у розгалужених розподільних мережах та малих міських електромережах, де особливо важлива стійкість до імпульсних грозових впливів.

1.3.3. Удосконалення та оптимізація системи заземлення

Глибинне (вертикальне) заземлення

У багатьох регіонах України звичайні поверхневі або короткі заземлювачі не забезпечують достатнього зниження імпульсного опору, особливо у кам'янистих, піщаних або пересушених ґрунтах. Це призводить до підвищених потенціалів опор під час грози та збільшує ризик зворотного перекриття ізоляції. Тому розвиваються технології глибинного (вертикального) заземлення, суть яких — введення металевого електрода на глибину, де ґрунт стабільно вологий і має менший питомий опір.

Глибинний заземлювач зазвичай виготовляється з оцинкованої сталі, міді або сталевих труб і заглиблюється на 20–50 метрів у ґрунт. На цій глибині вміст вологи стабільний, а опір — менший та менш залежний від погодних умов. Поєднання вертикального та горизонтального елементів дозволяє оптимізувати розтікання струму у ґрунті. Монтаж таких заземлювачів потребує спеціальних бурових або ударних механізмів, однак термін експлуатації системи подовжується на десятки років.

Переваги:

- Кардинальне зменшення імпульсного опору заземлення — іноді у 3–5 разів у порівнянні із наземними контурами.
- Стабільність електричних параметрів за різної погоди, сезонних змін або після тривалої експлуатації.

- Дозволяє впевнено експлуатувати ЛЕП у посушливих регіонах або на легких ґрунтах.

Недоліки:

- Висока вартість обладнання, монтажних і авторських робіт.
- Потрібні дозволи й дослідження для буріння (екологічні й гідрогеологічні обмеження).
- У разі пошкодження — складний ремонт і діагностика.

У країнах з посушливим кліматом (Ізраїль, Казахстан, Південна Африка) глибинне заземлення — майже стандарт для ЛЕП та підстанцій. В Україні такі рішення набули застосування на Каховській ГЕС, великих промислових об'єктах, фермах відновлюваної енергетики.

Використання спеціальних матеріалів для заземлення

У складних ґрунтових умовах, а також на локальних електростанціях та сучасних підстанціях навіть глибинного заземлення може бути недостатньо. В таких випадках оптимальним виявляється впровадження спеціальних матеріалів, які дозволяють поліпшити чи стабілізувати електропровідність ґрунту поряд із заземлювачем.

- Електропровідний бетон. Втілення ідеї використання фундаменту як масивного заземлювача шляхом додавання в бетон спеціальних електропровідних добавок (графіт, сталеві стружки). Застосовується для основ опор, підстанцій, промислових об'єктів.
- Хімічні заземлювачі. Заповнення заземлювачів спеціальними електролітами, що поступово просочують ґрунт, знижуючи його питомий опір і забезпечуючи стабільний контакт металу з землею. Суміщаються з класичними й глибинними схемами.

Переваги:

- Значно покращують роботу заземлення на несприятливих ділянках.
- Подовжують робочий цикл системи, суттєво зменшують ризик аварій у разі тривалих посух.

- Дають змогу використовувати існуючі будівельні матеріали без складних реконструкцій.

Недоліки:

- Потребують контролю та періодичного оновлення/відновлення хімічних компонентів.
- Деяке підвищення вартості будматеріалів і монтажу.
- Є певний ризик для екології в разі використання агресивних електролітів (вимагає сертифікації).

Застосовуються впродовж понад 20 років у регіонах Середньої Азії, Північної Африки, у харчовій і фармацевтичній промисловості ЄС. В Україні — у новобудовах енергетики та при реконструкції старих опор.

Мережеві системи заземлення (сітки)

Для потужних підстанцій, складних розподільних вузлів та великих об'єктів важливим є не лише захист від перенапруг, а й рівномірний розподіл потенціалу на поверхні землі. Для цього впроваджують мережеві сітчасті заземлювачі — систему провідників, розкладених навколо основи опори чи вздовж периметра майданчика.

Сітка ефективно розсіює струм у ґрунті, мінімізуючи небезпечну крокову напругу у випадку грози чи аварії. Комплексування з вертикальними (глибинними) чи хімічними заземлювачами підвищує надійність системи.

Переваги:

- Надійний захист персоналу та обладнання навіть при потужних розрядах.
- Система легко масштабується — можна додавати нові секції без заміни всієї сітки.
- Довгий термін служби, мінімальна кількість аварій при правильному розрахунку.

Недоліки:

- Значна кількість витраченого матеріалу — потребує металу, тому дорожчає у порівнянні з точковим або глибинним заземленням.
- Потрібно проводити професійний розрахунок (нерівномірний ґрунт, близькість інших підземних комунікацій).
- Періодично необхідно контролювати стан з'єднань і металу всієї заземлювальної сітки.

Сітчасті заземлення стандарт для потужних підстанцій США, Великої Британії, Франції. Для деяких об'єктів критичної інфраструктури впровадження таких систем стало обов'язковим за вимогами сучасних стандартів (ІЕС, ІЕЕЕ). В Україні — майже обов'язковий елемент при проектуванні підстанцій 330 кВ і вище, а також для розподільних транспортних вузлів на залізницях.

1.3.4. Пасивні конструктивні методи

Використання розщеплених фаз

Для ЛЕП надвисокої напруги (330 кВ і вище) останніми десятиріччями стандартом стало застосування розщеплених фаз — замість одного проводу на фазу використовують два чи більше (зазвичай 2–4) проводів, рознесених на певній відстані.

Завдяки збільшенню еквівалентного радіусу фази, поліпшується профіль електричного поля довкола проводу, зменшується напруженість поля поблизу поверхні. Це знижує ймовірність прямого ураження блискавкою фази, а також зменшує втрати на коронний розряд, підвищує технічну ефективність ЛЕП.

Переваги:

- Підвищення "захисного потенціалу" фази: зниження кількості грозових пошкоджень у 1,5–2 рази.
- Суттєве зменшення електромагнітних втрат і рівня шуму.
- Дозволяє передавати більші потужності без збільшення напруги.

Недоліки:

- Зростання матеріаломісткості (додатковий метал, опори, ізолятори).

- Ускладнення монтажу, збільшення вартості ремонту та обслуговування лінії.

- Здебільшого застосовується лише для ЛЕП з напругою від 220–330 кВ та вище.

ЛЕП з розщепленими фазами — стандарт для національних електромереж Франції, Німеччини, країн Скандинавії, Китаю, а з 1995 року — і для частини ЛЕП 330 кВ+ в Україні (магістральні лінії між ОЕС). За останніми дослідженнями, відбувається не лише підвищення стійкості до грозових впливів, а й економія в експлуатації через зниження втрат.

Додаткові троси та екранування

Якщо протяжність лінії велика, а також якщо вона проходить над відкритою місцевістю (річки, поля), ЛЕП захищають не одним, а двома або більше грозозахисними тросами. У спеціальних випадках троси розміщують з різними кутами захисту або формують системи "екранування" окремих ділянок (входи на підстанції, згущення тросів у місцях перетинів тощо).

Додаткові грозозахисні троси монтують по краях або вздовж лінії, створюючи широку "зону безпеки". Для найвідповідальніших місць (входи на підстанції, проммайданчики) передбачено системи екранування з дрібним кроком розташування тросів і опор — так утворюється багатошарова захисна зона, що різко знижує ймовірність ураження апаратури.

Переваги:

- Максимальне зменшення ймовірності прямого влучання блискавки у фазні проводи.

- Гнучкість у конфігурації захисту — легко адаптувати під місцеві особливості.

- Ефективно поєднується з іншими методами (ОПН, сітки заземлення тощо).

Недоліки:

- Зростання витрат на матеріали та монтаж.
- Не завжди можливе встановлення на усіх опорах через конструктив або обмеження по масі.
- Екранування суттєво застосовують лише для спеціальних об'єктів або при підході лінії до великих підстанцій.

Широкі системи екранування вважаються стандартом для об'єктів енергетики США, Японії, Китаю. В Україні подібні рішення застосовують на підходах до АЕС, ГЕС, при перетині над залізницями та автошляхами. Дослідження показують, що ймовірність відключення таких ділянок від грози зменшується щонайменше удвічі.

1.3.5. Адаптивні та керовані системи

Системи дистанційного керування заземленням

Зі зростанням інтеграції автоматизованих систем у енергетиці все ширше впроваджуються рішення, що дозволяють оперативно або навіть автоматично змінювати стан заземлювачів ЛЕП. Це особливо актуально в умовах непередбачуваних погодних впливів або при наявності складних релейних схем, де важливо поєднати захист від блискавки і низькі втрати під час нормальної експлуатації.

На опорах або в окремих шинних вузлах монтують комутовані заземлювачі, які перебувають у нормальному режимі в розімкнутому стані (для зменшення струмів короткого замикання чи паразитних струмів у мережі). При реєстрації наближення грозової активності (датчики електричного поля, атмосферного тиску), керована система миттєво з'єднує заземлення з опорою, формуючи ефективний шлях для стикувальних і імпульсних струмів. Після небезпечного періоду система повертається у вихідне положення.

Переваги:

- Дозволяє гнучко реагувати на реальні атмосферні умови, не жертвуючи нормальною роботою мережі.
- Знижує ризик додаткових пошкоджень через постійно ввімкнене заземлення (великий плюс для сучасних складних мереж).
- Потенціал для централізованої оперативно-диспетчерської системи контролю й аналізу аварійності.

Недоліки:

- Досить висока вартість впровадження та складність систем автоматизації.
- Потреба у надійному каналі зв'язку і резервному живленні.
- Вимагає кваліфікованого персоналу для обслуговування й адаптації системи під локальні умови.

Технологія дистанційних заземлювачів розпочала свій шлях у Японії, де з 2010-х років вона активно застосовується в прибережних районах і на островах. У Європі подібні системи стають частиною «розумних підстанцій» для передачі даних у SCADA. В Україні окремі елементи дистанційного контролю вводяться на експериментальних вузлах магістральних мереж.

Інтелектуальні системи моніторингу та керованого захисту

З розвитком концепції «розумних мереж» (Smart Grid) актуальності набувають системи моніторингу стану ізоляторів, грозозахисних тросів, підстанцій у режимі реального часу. Динамічна діагностика дозволяє не просто реагувати на проблему, а й превентивно її відстежувати та ліквідувати.

Інтелектуальні датчики встановлюють на ключових вузлах мережі, вони вимірюють мікрокліматичні та електричні показники, фіксують мікророзряди, корона-ефекти, напругу на ізоляторах. Зібрані дані потрапляють у централізований пункт моніторингу, де на основі алгоритмів

(у т.ч. з використанням штучного інтелекту) формуються сигнали про аварійність, даються рекомендації з оперативного втручання.

Переваги:

- Значне підвищення надійності системи — більшість проблем виявляються на ранній стадії.
- Економія коштів на позаплановий ремонт і аварійне відновлення.
- Можливість гнучко керувати мережею і точно локалізувати зони ризику чи пошкодження.

Недоліки:

- Складність й вартість широкого розгортання на існуючих ЛЕП, особливо в сільських та важкодоступних регіонах.
- Необхідність узгодження стандартів даних, інтеграції з існуючими ІТ-системами.

В Європі та США розгортаються пілотні проєкти, що передбачають повну автоматизацію контролю критичних об'єктів електромережі. В Україні локальні елементи інтелектуального моніторингу вже встановлено на нових підстанціях у Київській, Харківській та Львівській областях. Розвивається співпраця між енергокомпаніями і стартапами в сфері Big Data й IoT для покращення захисту ЛЕП від грозових ушкоджень.

1.3.6. Порівняльний аналіз сучасних та перспективних методів

Для комплексної оцінки доцільності застосування сучасних і перспективних методів підвищення грозостійкості ЛЕП доцільно порівнювати їх за такими критеріями: ефективність, вартість, експлуатаційна складність, універсальність та специфіка використання.

Таблиця 1.2 Структуроване порівняння зазначень вищих технологій

Метод	Ефективність зниження відключень	Вартість впровадження	Складність експлуатації	Типові області застосування
Класичний грозотрос	Середня	Низька	Низька	Універсальна (70–500 кВ, різні місцевості)
Активні блискавковідводи	Висока	Висока	Середня	Високі опори, підстанції, важкодоступні ділянки
Гібридні системи (трос+ОПН)	Дуже висока	Висока	Висока	Відповідальні мережі 110–750 кВ, об'єкти стратегічного значення
СОР, РДІ	Висока	Висока	Середня	Магістральні ЛЕП, гірські та проблемні ґрунти
Глибинне, мережеве заземлення	Середня	Середня/Висока	Середня	Посушливі/скелясті ґрунти, старі й реконструйовані ЛЕП
Пасивні конструктивні методи (розщеплені фази, екрани)	Середня-Висока	Висока	Середня	ЛЕП 220–750 кВ, протяжні лінії, вхід на підстанції
Адаптивні, керовані і "розумні" системи	Висока	Висока	Висока	Підстанції, стратегічні вузли мережі, Smart Grid

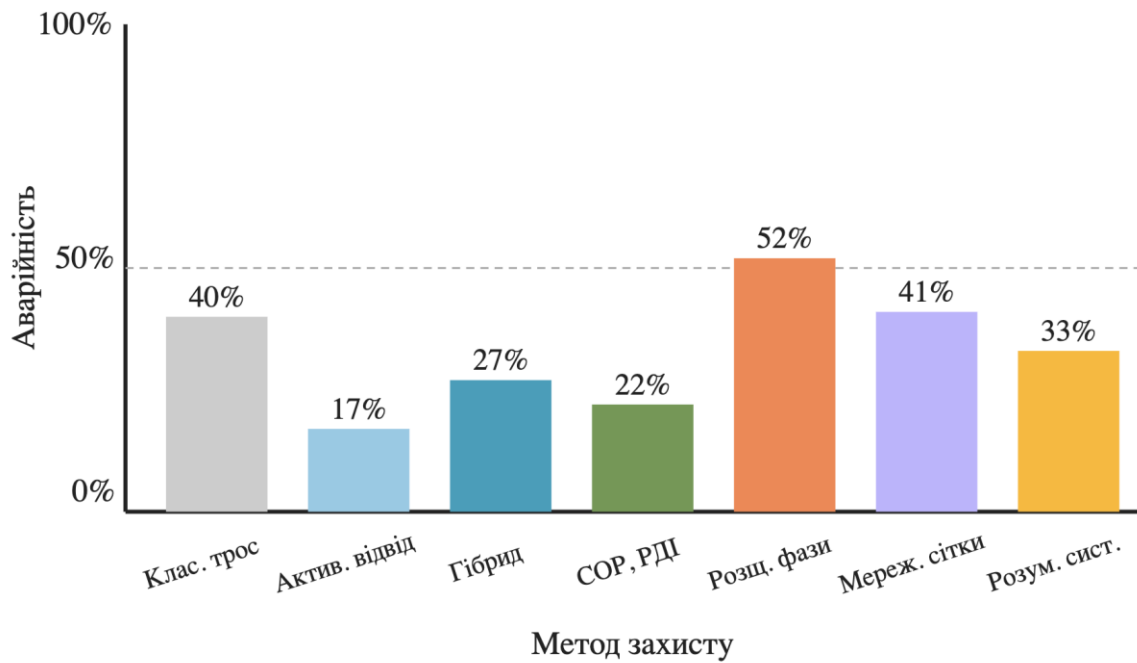


Рис. 1.1. Діаграми впливу методів на аварійність.

Умовна аварійність (%) ЛЕП при застосуванні різних методів захисту (менше — краще). Порядок розташування методів у діаграмі відповідає принципу: від простих до складних систем захисту.

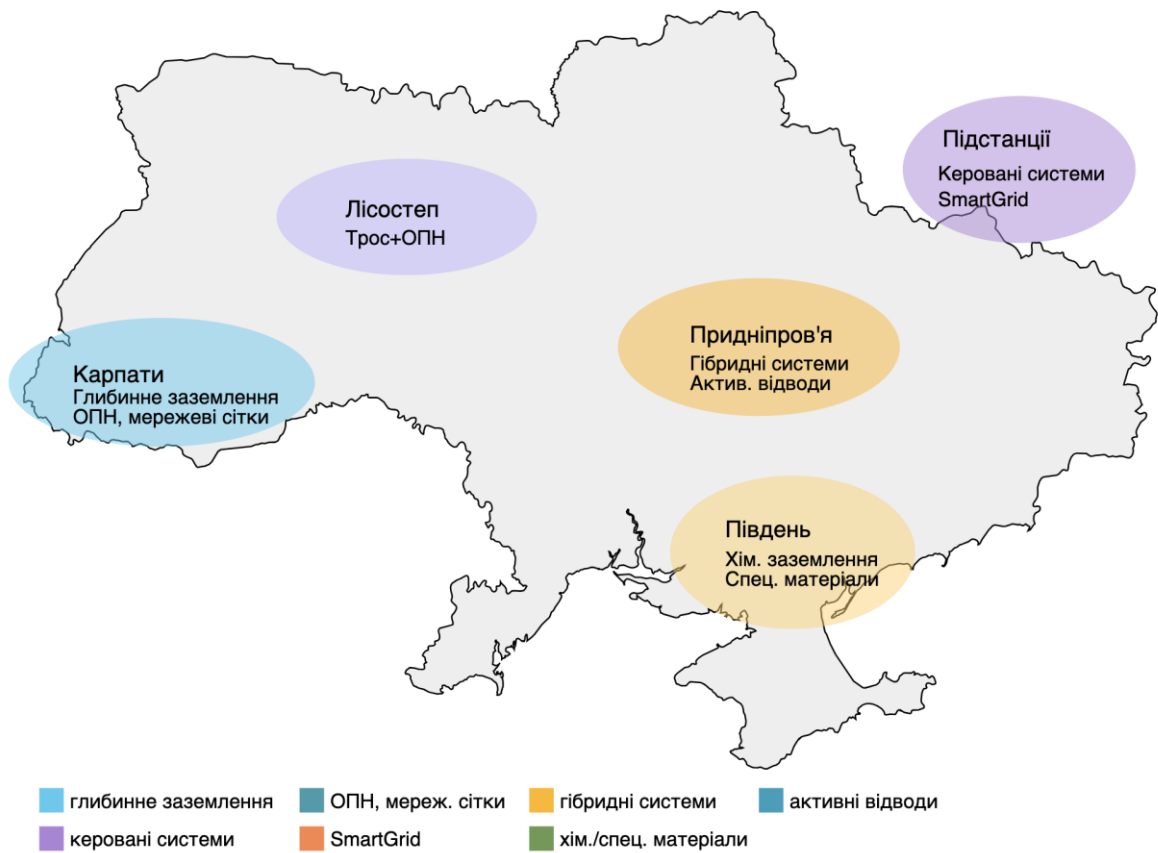


Рис. 1.2. Карта України з позначенням оптимальних сучасних методів підвищення грезостійкості ЛЕП по регіонах.

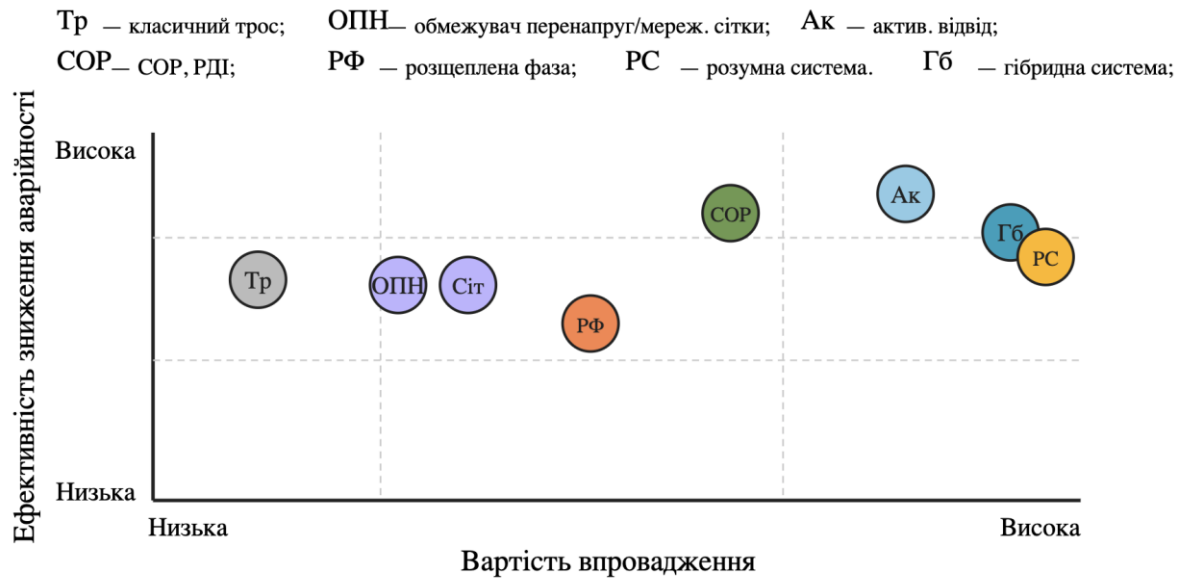


Рис. 1.3. Порівняльний графік: ефективність зниження аварійності та вартість впровадження сучасних методів підвищення грезостійкості ЛЕП.

2. МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ГРОЗОСТІЙКОСТІ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

2.1. Властивості блискавки

Струм блискавки є найкраще дослідженою серед усіх властивостей блискавки.

На рисунку 2.1 подано типовий імпульсний струм на об'єкті, ураженому блискавкою. З огляду на захист від грози, основним параметром імпульсу струму блискавки $i_m = i_m(t)$ є максимальне значення блискавкового струму I_m (струм блискавки). Ще одним параметром, який має вплив на величину перенапруг в об'єкті, ураженому блискавкою, є крутість струму, тобто швидкість зростання на фронті імпульсу di_m/dt . Оскільки в різних точках фронту імпульсу величина швидкості наростання струму відрізняється, під крутістю струму блискавки, зазвичай, мають на увазі її середній показник: $\alpha = \frac{I_m}{T_1}$. Тривалість фронтальної частини імпульсу T_1 визначається так. На діаграмі імпульсу струму позначають точки фронту, в яких струм дорівнює $0,3 I_m$ та $0,9 I_m$. Через ці пункти проводиться пряма для перетину з осями, що відповідають нульовому рівню струму й амплітудній величині струму ($I_m = 1$). Проміжок часу між цими двома точками позначають T_1 (див. рис.2.1) і називають тривалістю фронту.

Після досягнення піку величини, імпульсний струм блискавки повільно зменшується до нуля. Довжину хвилі або тривалість імпульсу блискавки зазвичай кількісно оцінюють часом півспаду T_2 (рис.2.1), тобто тривалістю від умовного початку імпульсу до того моменту, коли після проходження максимуму крива імпульсу спадає до рівня половини амплітудного значення струму. За основним імпульсом блискавкового струму

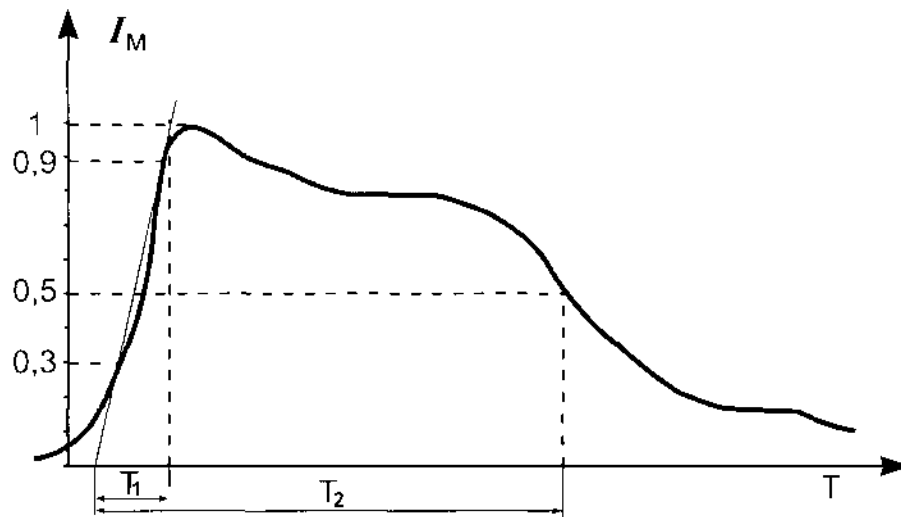


Рис. 2.1. Осцилограма блискавкового струму

блискавка може супроводжуватися повторними імпульсами. Для спрощених обчислень використовують середні розподіли I_M та a без урахування різниць між першим та наступними імпульсами. У таких випадках статистичний розподіл можна описувати експоненційними функціями такого вигляду:

$$P(I_M) = \exp(-k_1 \cdot I_M); \quad P(a) = \exp(-k_2 \cdot Ia), \quad (2.1)$$

де $P(I_M)$ та $P(a)$ - це ймовірність того, що амплітуда (або крутість) в одному розряді блискавки перевищить задане значення;

$k_1 = 0,038$ ($k_1 = 0,077$) - для рівнинних (гірських) регіонів;

$k_2 = 0,064$ ($k_2 = 0,128$) - для рівнинних (гірських) регіонів.

Варто вказати, що співвідношення (2.1), яке трапляється у багатьох джерелах, не відповідає рекомендаціям Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК). За стандартами МЕК, нормативними беруть імовірності, наведені в таблиці 2.1.

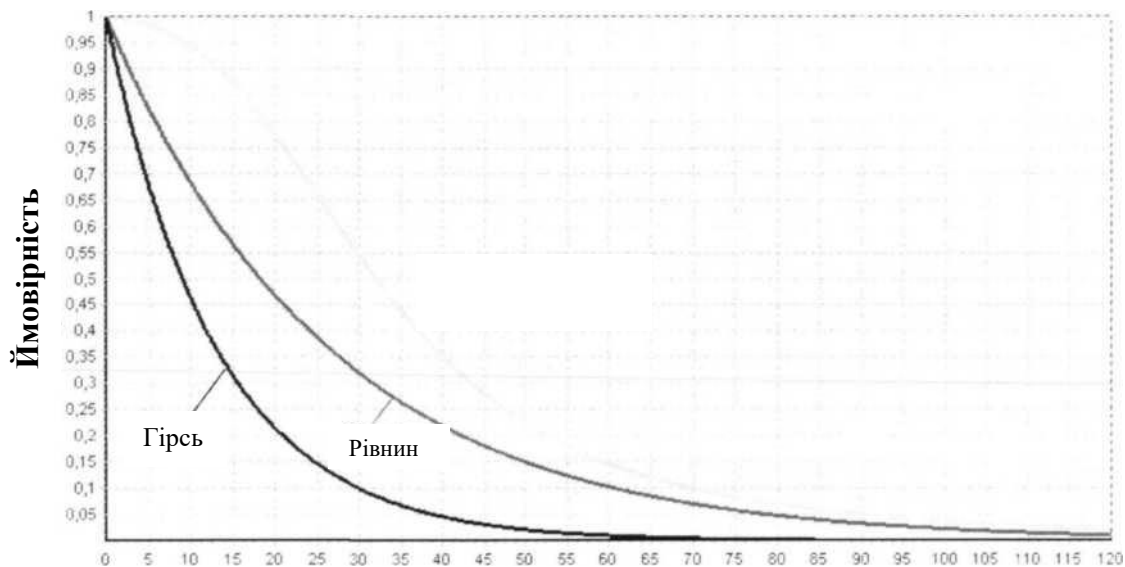
Таблиця 2.1. Статистичні ймовірності струмів блискавки

Блискавковідводи	І _м , кА	4	20	90	
	P(I _м)	0,98	0,80	0,05	
Будинки і споруди	І _м , кА	3	6	10	15
	P(I _м)	0,99	0,98	0,95	0,85

Апроксимація цих реперних точок може виконуватися відповідно до формули:

$$P(I_m) = \left(1 + 2,1 \cdot 10^{-3} \cdot I_m + 1,4 \cdot 10^{-4} \cdot I_m^2 + 2,4 \cdot 10^{-5} \cdot I_m^3\right)^{-1} \quad (2.2)$$

Ймовірність появи блискавки зі струмом, більшим за обраний



Сила струму блискавки, що проходить через пошкоджений об'єкт, кА

Рис. 2.2. Ймовірнісний розподіл струму блискавки

Як показано на рис. 2.2, спостерігається істотна відмінність між ймовірностями за формулою (2.1) та за рекомендаціями МЕК. Особливо важливо те, що ймовірності виникнення блискавок з невеликими струмами, отримані за (2.1), неточно відображають експериментальні результати для малих значень струму.

Між амплітудою струму блискавки та його крутістю зафіксований слабкий позитивний кореляційний зв'язок, тобто для більш високих

амплітуд зазвичай спостерігаються й більші крутості, й навпаки. Проте нині наявна інформація не дозволяє забезпечити достовірну кількісну характеристику цієї залежності. Внаслідок того, що кореляційний зв'язок досить низький між I_m та a при розрахунках часто припускають, що амплітуда та крутість струму блискавки є незалежними випадковими величинами.

Тривалість фронту T_1 та тривалість хвилі T_2 атмосферного розряду є випадковими величинами, причому статистичні розподіли цих параметрів мають значні розбіжності при первинних і повторних розрядах. Перші імпульси звичайно мають більшу тривалість фронту та хвилі, ніж наступні розряди.

Тривалість фронту першого розряду блискавки змінюється від 2 до 10 мкс з середнім значенням 5 мкс. Для повторних розрядів цей показник значно менший — у середньому 0,6 мкс.

Тривалість хвилі у першого імпульсу блискавки зазвичай знаходиться в діапазоні $20 \div 200$ мкс, а середнє значення становить 75 мкс. У повторних імпульсів ця величина приблизно вдвічі менша — у середньому 32 мкс. Одноразові блискавки трапляються у 20 % випадків, а кількість розрядів у інших випадках варіює від 2 до 10. Іноді спостерігали блискавки, у яких кількість розрядів перевищувала 20.

Сукупна тривалість багатократного блискавкового розряду може досягати однієї секунди, хоча такі подовжені удари зустрічаються рідко. Переважна більшість ударів тривають менше ніж 0,3 с. Проміжки часу між повторними розрядами коливаються від 0,1 до 0,5 с, у середньому вони дорівнюють 0,06 с. Між розрядами по каналу блискавки проходить струм приблизно 100 А.

Для виконання розрахунків перенапруг на об'єктах, уражених блискавкою, потрібно прийняти еквівалентну схему заміщення каналу блискавки з струмом, що тече в об'єкт. Значення еквівалентного опору каналу блискавки визначається миттєвим значенням струму на фронті:

$$Z_M = 140 \cdot \left(1 + \frac{240}{I_M} \right), \quad (2.3)$$

де Z_M подається в омах, а I_M – у кілоамперах; при цьому $5 < I_M < 300$ кА.

З іншого боку, струм блискавкового розряду, який протікає по пошкодженому об'єкту, пов'язаний як з розрахунковим хвильовим опором каналу блискавки (2), так і величиною опору заземлення об'єкта. Як зазначено можна записати:

$$I_{об} = I_{об}^{R=0} \cdot \frac{Z_M}{Z_M + Z_{об}}, \quad (2.4)$$

де $I_{об}^{R=0}$ – максимальне значення струму блискавки, що проходить через добре заземлений об'єкт;

$Z_{об}$ – еквівалентний хвильовий опір ураженого об'єкта. Вираз (2.4) отриманий із схеми на рис.2.3.

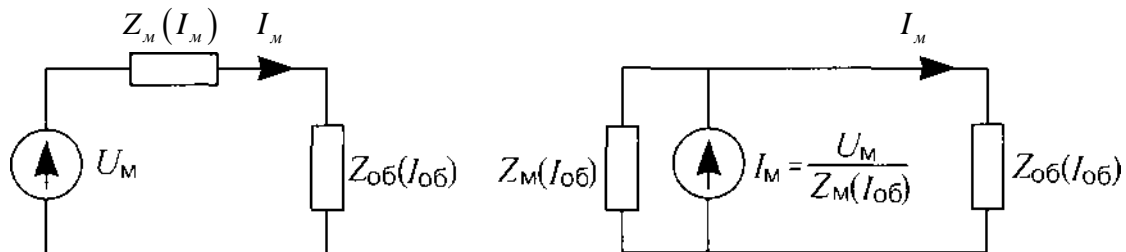


Рис. 2.3. Еквівалентні розрахункові схеми для знаходження струму в точці удару блискавки

На рисунку 2.3 символом U_M вказано умовне значення напруги між хмарою та землею під час грози.

Найбільш репрезентативним критерієм активності грозової діяльності є кількість ударів блискавки на 1км^2 площу землі за грозовий сезон. Протягом однієї грозової години зазвичай відбувається $n_m = 0,06 \div 0,1$ удару блискавки на 1км^2 поверхні Землі. Середнє значення тривалості грози

за один грозовий день складає 1,5–2 години. Середня кількість ударів блискавки у площу 1 км² за рік визначається за формулою:

$$N_1 = n_m \cdot n_y, \quad (2.5)$$

де n_y – кількість грозових годин на рік для конкретної місцевості.

Кількість грозових годин встановлюється на основі багаторічних метеоспостережень, є випадковою величиною та залежить від особливостей місцевості. Для розрахунків доцільно застосовувати $N_1 = 3$. Однак ці значення усереднені. Якщо є локальні метеодані, слід брати до уваги саме їх. Ураження об'єкта блискавкою має імовірнісний характер: чим вище об'єкт і кращий у нього заземлювач, тим більша ймовірність його ураження.

Для оцінки кількості уражень ліній електропередачі (ЛЕП) ударами блискавки потребується знати еквівалентну (з погляду захисту від блискавки) площу $S_{ЛЕП}$. Її визначають згідно з формулою:

$$S_{ЛЕП} = (W + 2R_{екв}) \cdot L \cdot 10^{-3}, \text{ де} \quad (2.6)$$

$$R_{екв} = \sqrt{h \cdot (256 - h)}, \text{ а} \quad (2.7)$$

$$h = h_{np} - \frac{2f}{3}, \quad (2.8)$$

де h_{np} – висота розташування проводу (троса) на опорі;

f - стріла провисання проводу (троса);

W – ефективна ширина ЛЕП, яка дорівнює відстані між крайніми проводами для ЛЕП без тросів, або відстані між двома тросами для ліній з тросовим захистом.

Всі ці відстані зазначаються у метрах, через що у (2.6) з'являється коефіцієнт 10^{-3} , оскільки площу потрібно отримати у квадратних кілометрах. Довжина ЛЕП (L) подається у кілометрах.

Якщо порівняти ЛЕП із грозозахисним тросом та без нього за формулою (2.6), можна помітити, що кількість влучень блискавки в ЛЕП із тросом трохи більша, ніж у аналогічних ЛЕП без троса. Це пояснюється збільшенням фактичної ширини ЛЕП за наявності тросового захисту.

2.2 Захист ліній електропередачі від грози

Показник грозостійкості ЛЕП визначається як кількість разів, коли лінія відключається протягом календарного року через вплив блискавкових розрядів. Цей показник відрізняється для ліній з установленими тросами та без них. Однак він є індивідуальним для кожної ЛЕП і не дає можливості безпосередньо порівнювати грозостійкість ліній, що мають різну довжину та розташовані в місцевостях з різною інтенсивністю гроз. Для проведення такого аналізу часто використовують питомий показник грозостійкості ЛЕП, при якому підраховують кількість відключень для лінії завдовжки 100 км за умови 100 годин грозової активності на рік.

2.2.1 Грозостійкість ЛЕП без тросового захисту

При обрахунках блискавкозахисту при прямих блискавкових розрядах (ПУБ) в ЛЕП без тросів вважають, що ймовірність ударів розподіляється однаково між опори та фазні проводи.

Ураження опори блискавкою

Коли блискавка вражає опору, через неї проходить струм у заземлювач і далі в ґрунт. На опорі виникає напруга, яку можна розділити на дві основні складові

$$U_{оп} = I_m R_u + L_y h_{TP} \cdot a, \quad (2.9)$$

де R_u – імпульсний опір заземлення опори;

L_y – власна індуктивність опори на одиницю довжини;

h_{TP} – висота траверси опори, на яку підвішено провід;

I_m та i – пікова величина блискавкового струму та крутість його наростання відповідно.

Різниця між наведеною на опорі напругою і поточним значенням фазної напруги на ЛЕП створює напругу на ізоляторах. Якщо цей рівень

напруги перевищує $U=50\%$ ізоляції (гірлянди), відбувається пробій повітряного інтервалу між траверсою та проводом – так зване зворотне перекриття. Значення імпульсної напруги, за якої спрацьовує ізолятор у 50% випадків ($U=50\%$), прийнято називати імпульсною електричною міцністю ізолятора (гірлянди). Для інженерних розрахунків цю величину з достатньою точністю можна визначити через монтажну висоту ізолятора (гірлянди) H_u та через усереднений показник пробивної напруги (E_{cp}) для повітряних проміжків у різко неоднорідному електрополі.

Напруга на опорі, що спричиняє зворотне перекриття на провід, обумовлюється як значенням струму блискавки, так і крутістю зростання фронту струму. Наприклад, якщо взяти вираз (2.9), то при нульовому значенні блискавкового струму перекриття можливе за певної крутості фронту $\alpha \geq \frac{U_{50\%}}{L_y \cdot h_{mp}}$, а при нульовій крутості фронту для виникнення

перекриття необхідний певний струм блискавки $I_m \geq \frac{U_{50\%}}{R_u}$. Оскільки події появи блискавки з визначеною силою струму та відповідною крутістю розглядають як незалежні, то для розрахунку ймовірності зворотного перекриття слід будувати так звану криву безпеки. Сукупна ймовірність зворотного перекриття визначається як:

$$P_{on} = \int_0^1 P(I_m) \cdot dP(a) = \int_0^1 P(a) \cdot dP(I_m). \quad (2.10)$$

Потрапляння блискавки у провід

Коли блискавка вражає фазний провід ЛЕП, вважають, що удар припадає на середину прольоту між сусідніми опорами. У такій ситуації струм блискавки розходить по проводу в обидва боки від місця ураження, створюючи на імпульсному хвильовому опорі проводу (Z_{np}) додаткове значення напруги, яку можливо визначити за законом Ома:

$$U_{np} = I_m \cdot \frac{Z_{np}}{2} ; Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.11)$$

При обчисленні імпульсного хвильового опору враховують появу коронного розряду під час проходження імпульсу блискавки. Виникнення корони збільшує ємність проводу щодо землі, що призводить до зменшення хвильового опору проводу на 10–15 %.

Струм блискавки, при якому на ізоляції проводу виникає перекриття, називають критичним струмом або захисним рівнем для лінії. У такому випадку значення захисного рівня струму визначають

$$I_{zy} = \frac{2U_{50\%}}{Z_{np}} \quad (2.12)$$

Якщо після дії блискавичного імпульсу дуга продовжує горіти і не затухає, то таку дугу називають силовою. Ймовірність такого переходу η_c визначається величиною середньої напруженості поля E_{cp} при максимально допустимій робочій фазній напрузі лінії ($U_{pф.маx}$).

Для ж/б та металевих опор замість (2.9) необхідно використовувати $U_{50\%}$ підставляючи $U_{pф.маx}$

$$E_{cp1} = \frac{U_{pф.маx}}{H_u} \quad (2.13)$$

Коли застосовують дерев'яні траверси, у розрахунках за (2.12) до будівельної висоти ізолятора додають еквівалентну довжину по траверсі від ізолятора до спуску на заземлення. Щоб її визначити, ділять відстань у сантиметрах по траверсі до спуску на 5 (для штирових ізоляторів) чи на 7 (для підвісних ізоляторів).

$$E_{cp1} = \frac{U_{p\phi.\max}}{H_u + \frac{L_{mp}}{m}}, \quad (2.14)$$

$m = 5$ (7) відповідно для штирових (підвісних) ізоляторів.

Величину ймовірності η_c визначають за емпіричною формулою

$$\eta_c = (160E_{cp1} - 6) \cdot 10^{-2} \quad (2.15)$$

Значення імпульсної міцності ($U_{50\%}$) у разі міжфазного перекриття для ЛЕП з металевими чи ж/б траверсами визначають так:

$$U_{50\%} = 2U_{u.50\%} \quad (2.16)$$

де $U_{u.50\%}$ - імпульсна стійкість гірлянди ізоляторів або штирового ізолятора. Для ЛЕП, де траверси виконані з дерева:

$$U_{50\%} = 2U_{u.50\%} + E_{cp2} \cdot l_{mp} \quad (2.17)$$

де E_{cp2} - середнє значення напруженості уздовж траверси ($E_{cp2} = 70$ кВ/м для підвісних ізоляторів і $E_{cp2} = 100$ кВ/м у випадку штирових ізоляторів);

l_{mp} - відстань по траверсі між фазними ізоляторами.

В такій ситуації захисний рівень струму обчислюють наступним чином:

$$I_{3y} = \frac{U_{50\%}}{R_u \cdot (1 - K_k)} \quad (2.18)$$

де K_k - коефіцієнт електромагнітного зв'язку між провідниками, для ЛЕП напругою 6-35 кВ він дорівнює 0,24.

Якщо між фазами 3 м, а висота ізолятора складає 50 см, $U_{50\%} = 250$ кВ, відповідно $I_{3y} = 32,8$ кА. Ймовірність виникнення ударного струму

блискавки з такою чи більшою силою становить 0,484.

Зрозуміло, що зі зменшенням імпульсного опору заземлення опори, струм захисного рівня зростає, а вірогідність переходу однофазного замикання у міжфазне зменшується.

Аналізуючи ЛЕП 6-35 кВ слід зазначити, що лінії цього класу напруги зазвичай працюють із ізольованою або компенсованою нейтраллю. Однофазне замикання на землю для таких мереж не вважається коротким замиканням, тому ЛЕП не вимикається. Але імпульсне перекриття ізоляції з ймовірністю η_m призводить до міжфазного замикання, яке вже вимикається релейним захистом. Ймовірність η_m у даному випадку також визначається за (2.15), лише при розрахунках середньої напруженості в (2.13, 2.14) береться подвоєна висота ізолятора. Це обумовлено тим, що міжфазне перекриття відбувається по найкоротшому еквівалентному шляху між ізолятором, траверсою та іншим ізолятором.

ЛЕП, що не оснащені пристроями автоматичного повторного включення (АПВ), будуть відключатися протягом року N разів:

$$N = N_1 \cdot S_{ЛЕП} \cdot [P_o \cdot P_{on}^2 + P_n \cdot P(I_{зв})] \cdot \eta_u \quad (2.19)$$

де P_o - вірогідність попадання блискавки в опору;

P_{on} - вірогідність виникнення зворотного перекриття з опори на провід;

P_n - ймовірність потрапляння блискавки у провід;

$P(I_{зв})$ - імовірність появи блискавки зі струмом захисного рівня або більшої величини;

η_u - ймовірність перетворення іскрового замикання між фазами у стійку силову дугу.

У разі застосування АПВ на ЛЕП для підрахунку кількості випадків перерв подачі електроенергії у формулу (2.19) необхідно включити множник, який дорівнює ймовірності неуспішної роботи АПВ. Як показує

статистика, вірогідність вдалого повторного включення лінії складає $\eta_{АПВ} \approx 0,85$, тоді грозостійкість ЛЕП без тросів розраховується за наступною формулою:

$$\eta = N \cdot (1 - \eta_{АПВ}) \quad (2.20)$$

Варто підкреслити, що навіть при успішній роботі АПВ після грозового вимкнення, лінія повертається до роботи через час, який визначає налаштування релейного захисту, тобто споживачі електроенергії зазнають короткочасних перерв. Окрім цього, залишковий ресурс АПВ вимикачів зменшується відносно кількості відключень ЛЕП згідно (2.19).

Для ЛЕП 6-35 кВ ефективно підвищити надійність електропостачання можна шляхом зниження середньої напруженості електричного поля $E_{срл}$ згідно (2.12, 2.13) завдяки збільшенню довжини дуги. Це досягається, якщо на ЛЕП встановити сучасні довгоіскрові розрядники (РДІ) різних видів, які добре показали себе в експлуатації. При низькій вартості вони майже повністю запобігають переходу іскрового замикання у стійку міжфазну силову дугу, тобто не відбувається відключення ЛЕП і зберігається ресурс АПВ-вимикачів.

Ще одним дієвим, хоча й дорогим методом, є монтаж нелінійних обмежувачів напруги паралельно ізоляторам ЛЕП.

2.2.2. Грозостійкість повітряних ліній електропередач із блискавкозахисними тросами

Влучення блискавки в опору

Залежності ймовірності проміжного межфазного перекриття ізоляції від висоти розміщення троса ілюструє рис.2.4, 2.5, 2.6. Верхня залежність розрахована для металеві траверси, а нижня — для дерев'яної траверси, що має відстань між підвісними ізоляторами 3 м. Розрахунок виконано за формулами (2.10) та (2.2) для металеві опори при 50% імпульсній міцності

гірлянди 250 кВ і імпульсному опорі розтікання струму на землю у 12 Ом.

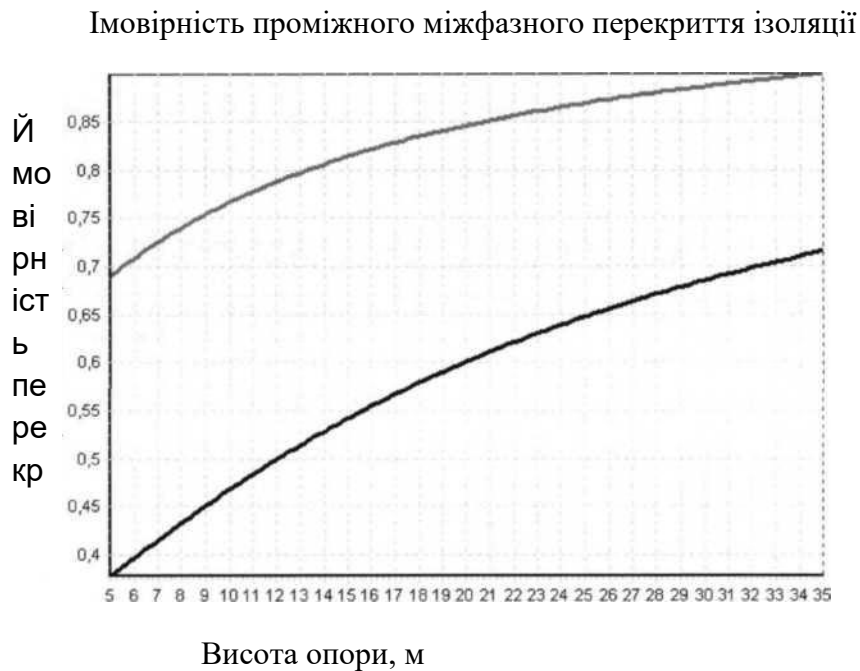


Рис. 2.4. Графіки залежності ймовірності імпульсного міжфазного перекриття ізоляції від висоти підвісу троса на металевій опорі.

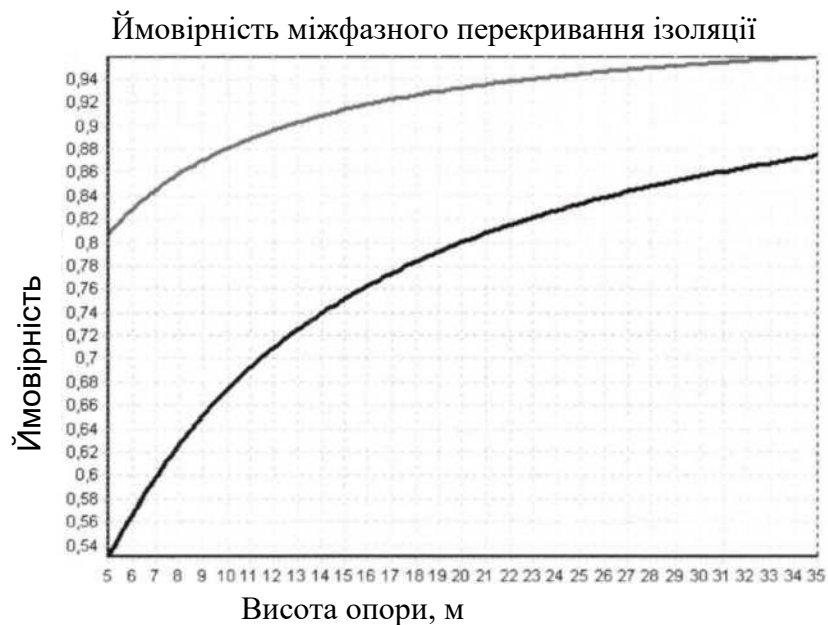


Рис.2.5. Залежності ймовірності імпульсного міжфазного перекривання ізоляції від висоти кріплення троса на одностійковій діелектричній опорі.

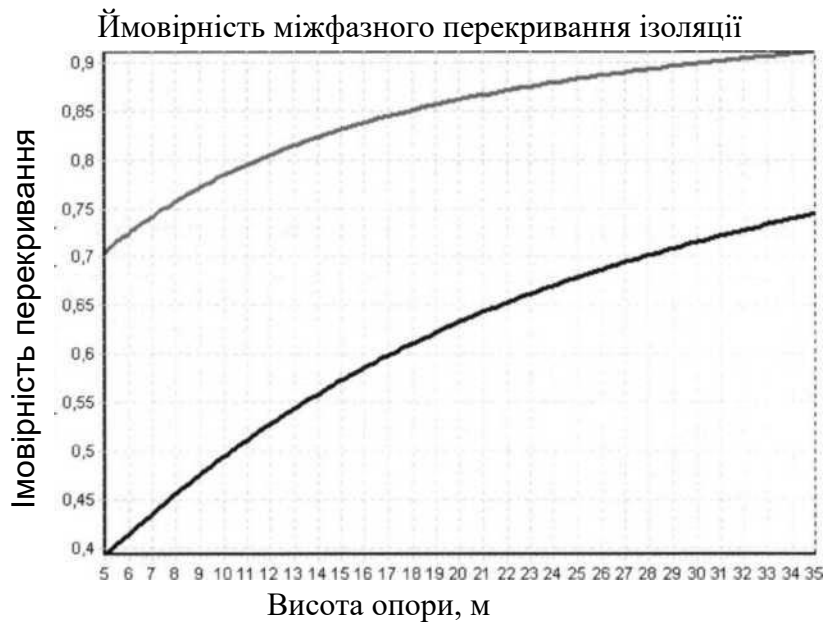


Рис.2.6. Графіки ймовірності імпульсного міжфазного перекривання ізоляції залежно від висоти закріплення троса на А-подібній діелектричній опорі.

Графіки залежності ймовірності імпульсного міжфазного перекривання ізоляції від імпульсного заземлення опори зображено на рис.2.7. Опора із залізобетону, висота кріплення троса 15 м. Верхня характеристика для металеві (ж/б) траверси, нижня - для дерев'яної (полімерної) траверси.

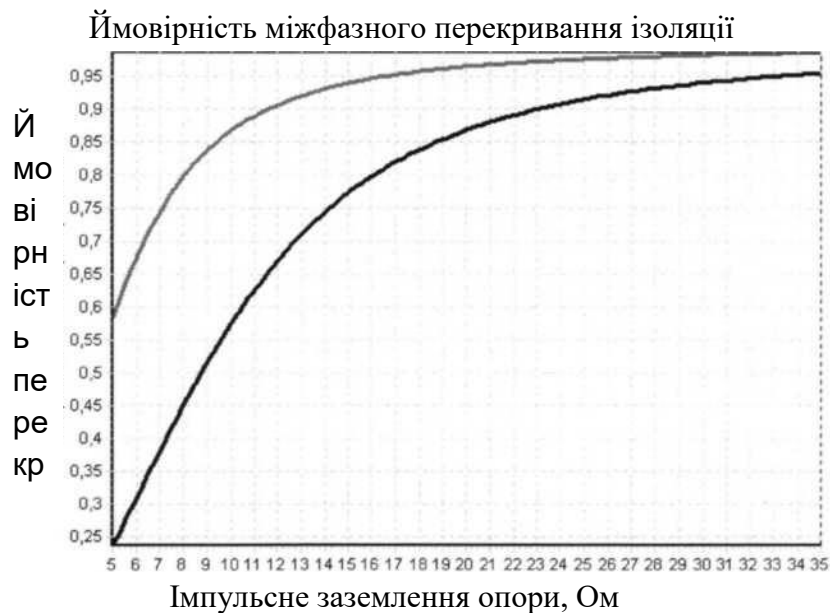


Рис. 2.7. Вплив величини імпульсного заземлення на ймовірність імпульсного міжфазного перекривання ізоляції.

Прорив блискавки крізь тросовий захист

Прорив блискавки крізь тросовий захист. Якщо блискавка долає тросовий захист, то розряд потрапляє у провід з подальшим перекиданням ізоляції на опорі, як було вказано у попередньому розділі. Ймовірність цієї події визначається за формулою

$$\lg(P(\alpha)) = \frac{a \cdot \sqrt{h}}{A} - B, \quad P(\alpha) = \exp\left(\ln(10) \cdot \left(\frac{a \cdot \sqrt{h}}{A} - B\right)\right) \quad (2.21)$$

де $A = 90$, $B = 4$, h — середнє значення висоти прокладання блискавкозахисного троса.

Параметри коефіцієнтів A , B встановлено на основі аналізу статистичної інформації з грозозахисту у мережах напругою 110-220 кВ. За відсутності експериментальних показників для ЛЕП 6-35 кВ, для визначення ймовірності прориву доводиться застосовувати коефіцієнти для ЛЕП 110-220 кВ. Оцінка ймовірності прориву блискавки через тросовий захист за формулою (2.21) має істотну похибку.

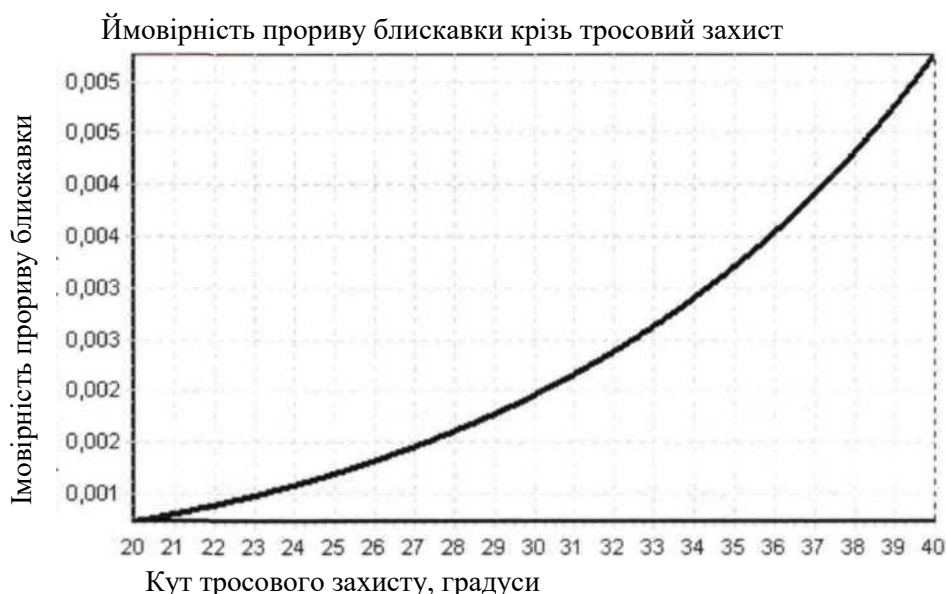


Рис. 2.8. Ймовірність прориву блискавки крізь тросовий захист у залежності від захисного кута при середній висоті підвішування проводу 15 м.

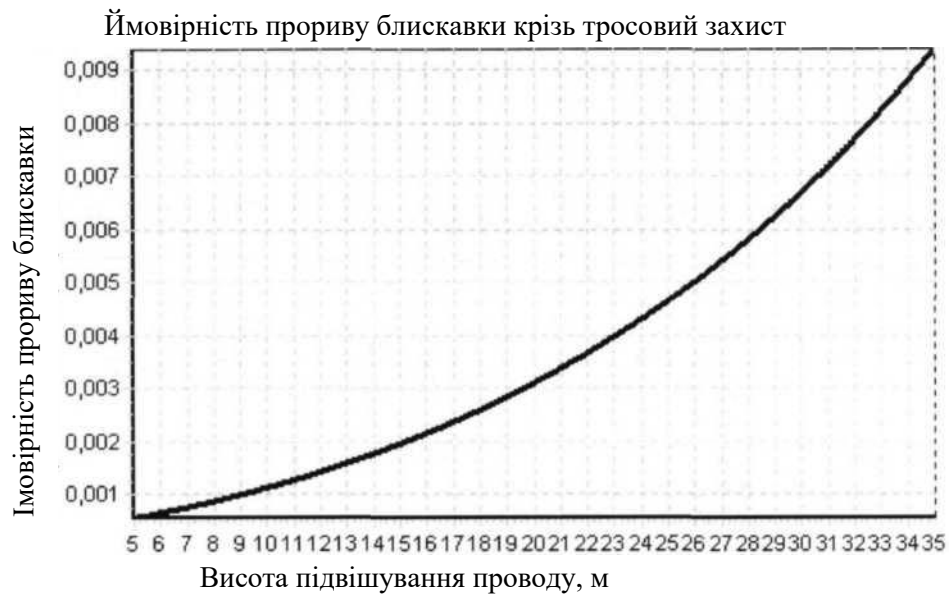


Рис. 2.9. Ймовірність прориву блискавки крізь тросовий захист залежно від середньої висоти підвішування проводу за захисного кута 30° .

Захисний кут зображено на рис. 2.10.

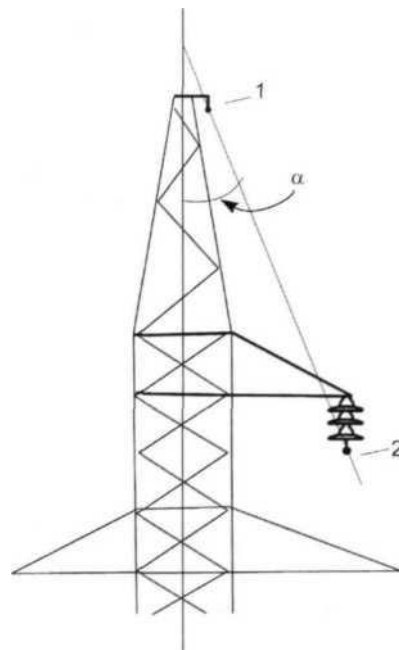


Рис. 2.10. Захисний кут (α) блискавкозахисного троса: 1 — трос, 2 — верхній провід.

Середній кут захисної зони дорівнює -30° . Біля підходу до підстанції, в небезпечній ділянці, цей кут зменшують до значень $22^\circ \div 25^\circ$. Зазвичай

такого ефекту досягають шляхом збільшення висоти підвішування тросу, тобто подовженням тросостійки.

Показник ймовірності перекриття ізоляції лінії при пробіі блискавки крізь тросову систему захисту визначається за (2.2), де величина струму захисного рівня обирається згідно (2.18). Тобто, цей розрахунок аналогічний із ситуацією ураження блискавкою проводу, розглянутою у попередньому розділі.

Потрапляння блискавки у трос між опорами та перекриття ізоляційного проміжку між тросом і проводом

Потрапляння блискавки у трос посередині прольоту разом із перекриттям повітряного проміжку між тросом і проводом. У випадку, коли дистанція між тросом і проводом менше ніж два відсотки від довжини прольоту, ймовірністю цього явища можна знехтувати.

У такому разі ймовірність імпульсного пробію міжфазної ізоляції при ураженні блискавкою ЛЕП з тросовим захистом знаходиться за:

$$P_m = P_o \cdot P_{m.on} + (1 - P_o) \cdot P(\alpha) \cdot P_m \quad (2.22)$$

де P_o – ймовірність ураження опори блискавкою $P_o = \frac{4h}{L_{прлета}}$;

$P_{m.on}$ – ймовірність перекриття міжфазної ізоляції в разі удару блискавки у опору;

$P(\alpha)$ – ймовірність прориву блискавки крізь тросову систему захисту;

P_m – ймовірність пробію ізоляції між фазами при потраплянні блискавки у провід, іншими словами $P_m = P(I_{3y})$, де струм рівня захисту визначається за (2.18).

Грозостійкість ЛЕП, оснащених тросовим захистом, обчислюють за формулою:

$$N = N_1 \cdot S_{ЛЕП} \cdot P_m \cdot \eta_m \cdot (1 - \eta_{АПВ}) \quad (2.23)$$

Відтак, щоб підвищити грозостійкість повітряних ліній електропередачі, необхідно здійснювати такі дії:

1. Встановлювати пристрої АПВ
2. Зменшувати величину імпульсного заземлення опор.
3. Підвищувати імпульсну міцність лінійної ізоляції.
4. Знижувати індуктивність опор завдяки встановленню додаткових струмовідводів на дерев'яних опорах та струмовідводів із матеріалів на кшталт міді чи алюмінію на всіх видах опор.
5. Застосовувати траверси з діелектричних матеріалів.
6. Зменшити кут захисту, який забезпечують троси.

Перераховані дії особливо бажано застосовувати в небезпечних ділянках ЛЕП біля підстанцій. Проте враховуючи, що одночасне виконання всіх запропонованих заходів для підвищення грозостійкості ЛЕП є складно здійсненним, зосередимо увагу на детальному аналізі лише одного зі способів, а саме – зменшення кута тросового захисту.

Під час проведення розрахунків були прийняті такі стандартні припущення:

1) усі прольоти в розрахунках вважалися однаковими; анкерних пролотів окремо не розглядали;

2) ймовірність переходу імпульсного пробую ізоляції у силову дугу визначалася за формулою

$$\eta_c = (1,6E_{cp} - 6) \cdot 10^{-2}, \quad (2.24)$$

$$E_{cp} = \frac{U_{\max.\phi}}{I_\delta}$$

де $U_{\max.\phi}$ - максимальна величина робочої фазної напруги;

I_δ - довжина іскрового проміжку (будівельна довжина гірлянди, відстань між тросом та проводом або між проводом і опорою).

3) Ймовірність проникнення блискавки через тросове захисне обладнання з наступним виникненням пробую фазного проводу визначали згідно з емпіричною формулою:

$$\operatorname{tg}(p(a)) = a \cdot \frac{\sqrt{h}}{90} - 4 \quad (2.25)$$

де h – середній рівень розташування блискавкозахисного троса.

4) Під час обчислення питомої стійкості ліній електропередачі до гроз приймали довжину ЛЕП 100 км та значення тривалості грозової активності 100 годин на рік. За цих умов:

$$N_{y\partial} = 4h \quad (2.26)$$

На відміну від стандартної методики розрахунку враховувалося, що зі зменшенням кута захисту тросом внаслідок збільшення висоти опорної тросостійки не лише спадала ймовірність пробою блискавки до проводу згідно з (2.25), але й збільшувалася дієва площа ЛЕП, а отже – і кількість потраплянь блискавки по (2.26).

Також, зі зменшенням кута тросового захисту внаслідок зміщення гірлянди ізоляторів по траверсі у бік опори (при зміні відстані між тросом і опорою) зростала ймовірність повторного перекриття з опори одразу на провід. Це потребує введення додаткового доданка P_{on-np} у формулу для визначення ймовірності повторного перекриття з опори на провід. Сукупна ймовірність такого повторного перекриття з іскровим переходом в силову дугу визначалася так:

$$P_{on} = \eta_{C1} \cdot P_{mp-np} + \eta_{C2} \cdot P_{on-np} - P_{mp-np} \cdot P_{on-np} \cdot \eta_{C1} \cdot \eta_{C2} \quad (2.27)$$

де P_{mp-np} - ймовірність імпульсного перекриття між траверсою та проводом, а η_{C1}, η_{C2} - ймовірність виникнення силової дуги згідно з (2.24).

Сукупна кількість відключень з урахуванням внесених корекцій дорівнює:

$$N_{відкл} = N_{y\partial} \left[\Delta_{on} P_{op} + \Delta_{mp} (P(a)) \cdot \eta_{C3} + P_{mp-np} \eta_{C1} \right] (1 - \eta_{АПВ}) \quad (2.28)$$

де Δ_{on} , Δ_{mp} - ймовірності удару блискавки в опору та трос.

Розрахунки за (2.28) виконувалися для ЛЕП з різними конструкціями опор для класів напруги 35 і 110 кВ. Для мереж 35 кВ у формулу (2.28) вносилися доповнення, оскільки однофазний пробій на землю у даних мережах не спричиняє негайного відключення лінії, тому в (2.28) враховувалася також міжфазна несправність.

Визначення ймовірності пробою ізоляції для (2.27), (2.28) виконувалося методом подвійного інтегрування за всіма можливими варіантами амплітуди блискавкової напруги і наростання фронту провідного струму.

2.3. Вплив зменшення захисного кута на ймовірність проникнення блискавки через тросовий захист

Захисний кут α часто застосовується при розробці тросових блискавковідводів для повітряних ліній електропередачі. Цей кут вважається додатним у разі, якщо фазні проводи розміщуються далі від осі опори, ніж троси, і так частково лишаються відкритими для блискавок, що не сходять згори. Зменшення горизонтального відхилення проводу відносно троса і підвищення троса над опорною конструкцією призводить до зниження значення кута α . При зростанні позитивного захисного кута надійність захисту зменшується. Значення кута захисту було запропоновано для узагальнення практичного досвіду досліджень ушкоджень від блискавки на лініях електропередач різної конструкції. Проте стало очевидно, що кут α не може повністю описати захисні властивості троса. Окрім кута, важливо враховувати ще й підняття троса відносно проводу Δh та висоту підвісу троса h_m . За сталого кута α від цього параметра визначається відстань між тросом і проводом, яка за стандартними рекомендаціями σ_e визначає рівень електричного взаємозв'язку. Із сукупності ліній з однаковим захисним кутом краще захищеною

виявляється та, де перевищення більше, а Δh і менша h_m .

На практиці використовують емпіричні залежності, які пов'язують ймовірність прориву блискавки до проводів з a та h_m , проте Δh у таких формулах не бере участі, що веде до зниження їх точності. Наприклад, є такі однотипні вирази:

$$\lg \Phi_{np} = \frac{a \cdot \sqrt{h_m}}{90} - 4 \quad (2.29)$$

$$\lg \Phi_{np} = \frac{a \cdot \sqrt{h_m}}{90} - 3,95, \quad (2.30)$$

де h_m [м], a — у градусах.

За деяких умов похибка таких формул може доходити до 300%, але експлуатація підтверджує отримані за ними оцінки ймовірності прориву. До зазначених співвідношень слід ставитися обережно у випадках опор вище 50 м, при малих або від'ємних значеннях захисного кута, адже основна база практичних даних отримана для ліній висотою до 40 м та додатних значеннях кута 20–30°. При цьому лише незначна частина інформації, яка слугувала основою для емпіричних формул, отримана шляхом прямих вимірювань. Переважно дані базуються на реєстрації кількості грозових відключень за винятком обрахованої кількості зворотних пробоїв, які визначаються досить неточно. Незважаючи на це, залежності (2.29, 2.30) показують переваги від'ємних кутів захисту. Дія тросів, прокладених далі від осі, аніж фазні проводи, тобто коли $a < 0$, подібна до захисту, який дає замкнений трос, що повністю оточує захищену ділянку. Такий тип блискавковідводу може забезпечити дуже низьку ймовірність проникнення блискавки до проводів. Проте влаштування від'ємних кутів захисту вимагає використання масивніших опор, що тягне за собою підвищене металоспоживання, і тому застосовується дуже рідко.

Попри те, що метод зменшення кута тросового захисту широко використовується, особливо за кордоном, досі немає публікацій, які б порівнювали експлуатаційні та розрахункові показники грозостійкості. Це слугує стимулом для проведення досліджень у сфері грозозахисту вже діючих ділянок ПЛ різних класів напруги.

Область захисту за кутом захисного троса моделюється як конус. Однак у нормативі не подається розгорнута методика обчислення захисного кута, а величину кута слід визначати з таблиць залежно від обраного рівня захисту.

Зі збільшенням висоти блискавковідводу h . За узагальненими статистичними даними і згідно з відомим емпіричним співвідношенням (2.32), для ймовірності влучання блискавки у захищену зону $P(\alpha)$ (ураження фазного проводу при використанні тросового захисту) приблизно у 25 разів менше встановленого стандартом МЕК. Це вказує на суттєве недооцінювання розмірів зони захисту для блискавковідводів стандартної висоти.

$$\lg(P(\alpha)) = \frac{a \cdot \sqrt{h}}{A} - B \quad (2.31)$$

$$P(\alpha) = \exp\left(\ln(10) \cdot \left(\frac{\alpha \sqrt{h}}{A} - B\right)\right) \quad (2.32)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{L_{mp}}{dh}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (2.33)$$

де $A = 90$, $B = 4$. Значення коефіцієнтів A , B отримано шляхом аналізу статистики щодо блискавкозахисту мереж 110-220 кВ;

h - середня висота підвішування блискавкозахисного троса, м;

dh - віддаль від траверси до троса з урахуванням довжини гірлянди, м;

L_{mp} - довжина траверси, м.

Визначення ймовірності перекриття ізоляції здійснюється за

допомогою подвійного інтегрування для всіх допустимих значень амплітуди блискавки та крутизни фронту її струму.

У цьому випадку ймовірність ураження грозою у межах зони захисту:

$$P(\alpha) = \exp\left(\ln(10) \cdot \left(a \frac{\alpha \sqrt{h+dh}}{A} - B\right)\right) \cdot 21(h+dh) \quad (2.34)$$

де

$h = H_{vir} - (H_{nir} - L_g - 7) \frac{2}{3}$ - середня висота підвішування

блискавкозахисного троса;

H_{vir}, H_{nir} - висота траверси зверху та знизу відповідно;

L_g - довжина гірлянди;

h - середня висота підвішування блискавкозахисного троса, м;

dh - відстань від траверси до троса з урахуванням довжини гірлянди,

м.

На відміну від стандартної методики розрахунку, тут узято до уваги, що при зменшенні кута тросового захисту за рахунок підвищення висоти тросостійки не тільки знижується ймовірність проникнення блискавки до проводу (за (2.25)), але й зростає ефективна площа ЛЕП, що ілюструється на рис. 2.9.

Слід також підкреслити, що використана програма враховує два протилежних ефекти — з одного боку, ймовірність зменшується при зменшенні кута, з іншого — збільшується при піднятті троса.

Для кожного типу опор, які розглядалися, визначали:

- ймовірність ураження фазного проводу при початковому положенні тросостійки;
- значення захисного кута при типовому розташуванні тросостійки;
- шанс пошкодження фазного проводу за умови захисного кута 23° , передбаченого ПУЕ;
- ймовірність ураження фазного проводу при мінімальному значенні захисного кута;

- найменший кут захисту при зміні положення тросостійки;
- розташування тросостійки для досягнення мінімального та 23-градусного кута захисту.

Для глибшого дослідження шляхів мінімізації ймовірності пошкодження фазного проводу та зменшення захисного кута пропонується використати метод зміни положення ізоляторної гірлянди вздовж траверси.

2.4. Вплив переміщення ізоляторної гірлянди по траверсі на ймовірність прориву блискавки через тросовий захист

Серед інших варіантів зміни кута захисту тросостійки виділяють переміщення місця кріплення ізоляторної гірлянди на траверсі. Якщо підвіска гірлянди розташована ближче до опори, це прирівнюється до зменшення L_{tr} у (2.33) та до зменшення захисного кута без змінення висоти монтажу троса. Такий засіб не завжди підходить для всіх типів опор. Якщо довжина стандартної траверси недостатня, переміщення може призвести до збільшення ймовірності перекриття між опорою та проводом. Переміщення по траверсі можливе доти, доки ймовірність перекриття «траверса — провід» перевищує «опора — провід». Це, перш за все, залежить від дистанції між проводом і траверсою (чи опорою). В такому разі необхідно розглянути можливість зміни положення підвішеної гірлянди у вертикальному напрямку при зростанні бокового навантаження від вітру.

З метою ширшого аналізу випадків прориву блискавки одночасно досліджувалися наслідки підвищення точки підвіски грозозахисного троса та переміщення ізоляторної гірлянди вздовж траверси в напрямку опори.

Змінюючи положення гірлянди по траверсі, відповідно змінюється і захисний кут. Це особливо суттєво при потраплянні блискавки у трос у середині прольоту — у цьому випадку кількість уражень становить $\approx 50\%$, решта ударів припадає на опору.

$$P(\alpha) = \exp\left(\ln(10) \cdot \left(a \frac{\alpha \sqrt{h}}{A} - B\right)\right) \cdot 3 \cdot b \cdot l \quad (2.35)$$

де

$$b \cdot l = 7 \cdot (h + dh) \quad (2.36)$$

При проходженні імпульсного струму блискавки по опорі та розрахунку ймовірності зворотного перекриття між траверсою і проводом, для оцінки імпульсної напруги на опорі застосовують значення h_{cp} . Тобто, для оцінки імпульсної міцності гірлянди напругу слід порівнювати з потенціалом на рівні траверси під час перекриття з траверси, а в разі перекриття з опори безпосередньо до проводу — враховувати напругу на опорі на рівні кріплення верхнього проводу. Оскільки траверса розташована вище проводу, на ній напруга більша, ніж на опорі на висоті проводу. Ця різниця визначена як:

$$dU = L_{on} \cdot I_z \cdot a \quad (2.37)$$

де L_{on} — питомна індуктивність опори, мкГн/м;

I_z — довжина гірлянди з урахуванням підйому через вітер, м;

a — крутість фронту імпульсу блискавки, кА/мкс.

До прикладу, при крутизні фронту $a = 32$ кА/мкс, $I_z = 1$ м, $L_{on} = 0,7$ мкГн/м (для залізобетонної опори), маємо, що $du = 22,4$ кВ, що при типовій пробивній напруженості 5 кВ/см відповідає 4,5 см. Тобто, відстань між поверхнею опори та проводом може бути на 4,5 см меншою за відстань між траверсою й проводом. Оскільки ця величина незначна, її можна не враховувати.

Протягом виконання обчислень для кожного з розглянутих типів опор були визначені:

- ймовірність ушкодження фазного проводу за початкового розміщення гірлянди ізоляторів на траверсі;
- кут захисту при стандартному розташуванні гірлянди ізоляторів на траверсі;

- ймовірність пошкодження фазного проводу за мінімальним захисним кутом;
- відстань між опорою і проводом, при якій ймовірність пошкодження фазного проводу є найменшою.

Відповідні результати аналізу ушкодження фазного проводу у випадку підвищення висоти троса та змін у положенні гірлянди ізоляторів на траверсі відображені у розділі 3.

3. РОЗРАХУНОК ПИТОМОЇ ГРОЗОСТІЙКОСТІ ЛЕП 35-220 КВ ЗА ЗАЛЕЖНОСТЮ ВІД КУТА ТРОСОВОГО ЗАХИСТУ

У поточному розділі наведені підсумки розрахунків як окремих складових рівняння (2.28), так і загальний підсумковий результат для ЛЕП із різними типами опор.

3.1. Підсумки обчислень ймовірності пошкодження фазного проводу залежно від висоти підвіски троса

Дослідженням методу зменшення кута тросового захисту, шляхом збільшення тросостійки для кожного типу опор, було встановлено:

- ймовірність ушкодження фазного проводу за початкового положення тросостійки;
- захисний кут за стандартного місцезнаходження тросостійки;
- ймовірність ушкодження фазного проводу при захисному куті 23° , регламентованому ПУЕ;
- ймовірність пошкодження фазного проводу за мінімального кута захисту;
- мінімальний захисний кут у разі зміни положення тросостійки;
- значення положення тросостійки для мінімального кута захисту і кута 23°

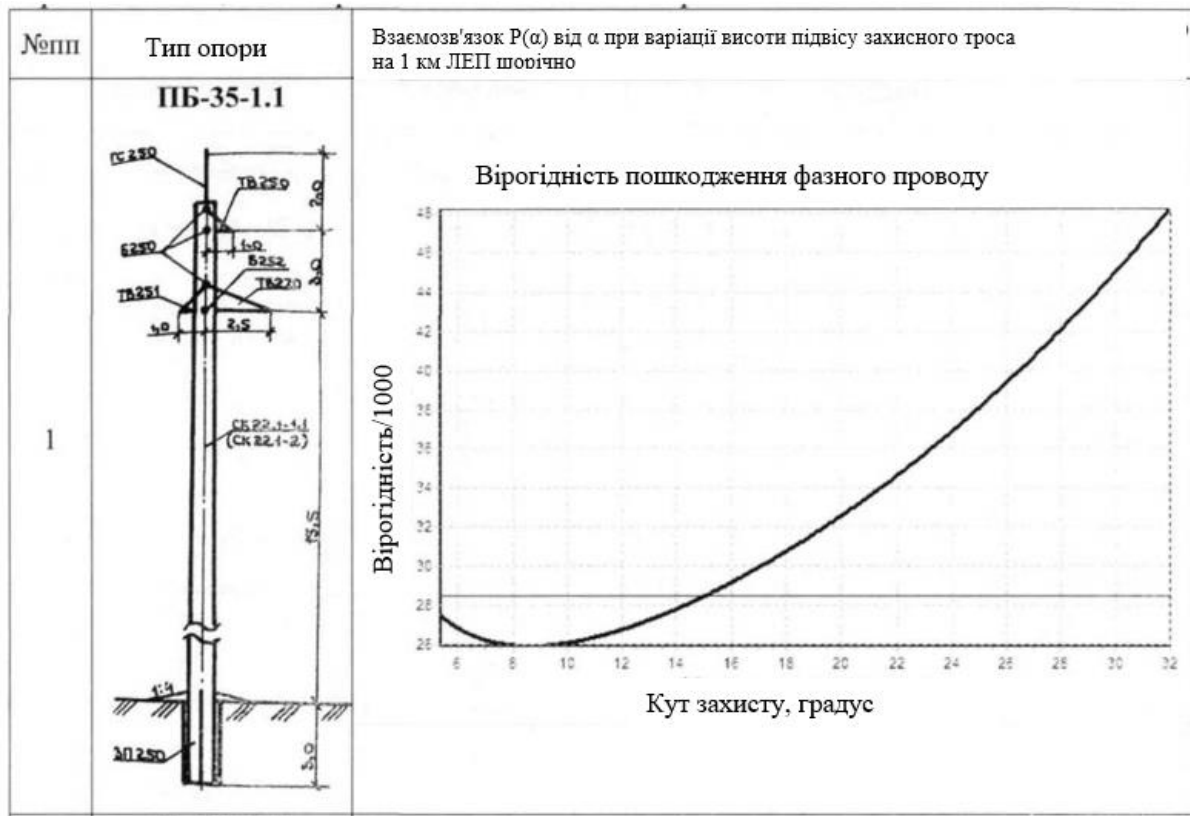
а також виконаний аналіз і зіставлення отриманих показників.

У таблиці 3.1 наведено результати розрахунків залежності ймовірності ушкодження верхнього фазного проводу (другий доданок у (2.28)) від кута тросового захисту для розглянутих конструкцій опор. Значення кута захисту змінювалися за рахунок підвищення висоти тросостійки. На графіках горизонтальна лінія відповідає ймовірності ушкодження фазного проводу, що на 10% перевищує мінімальну.

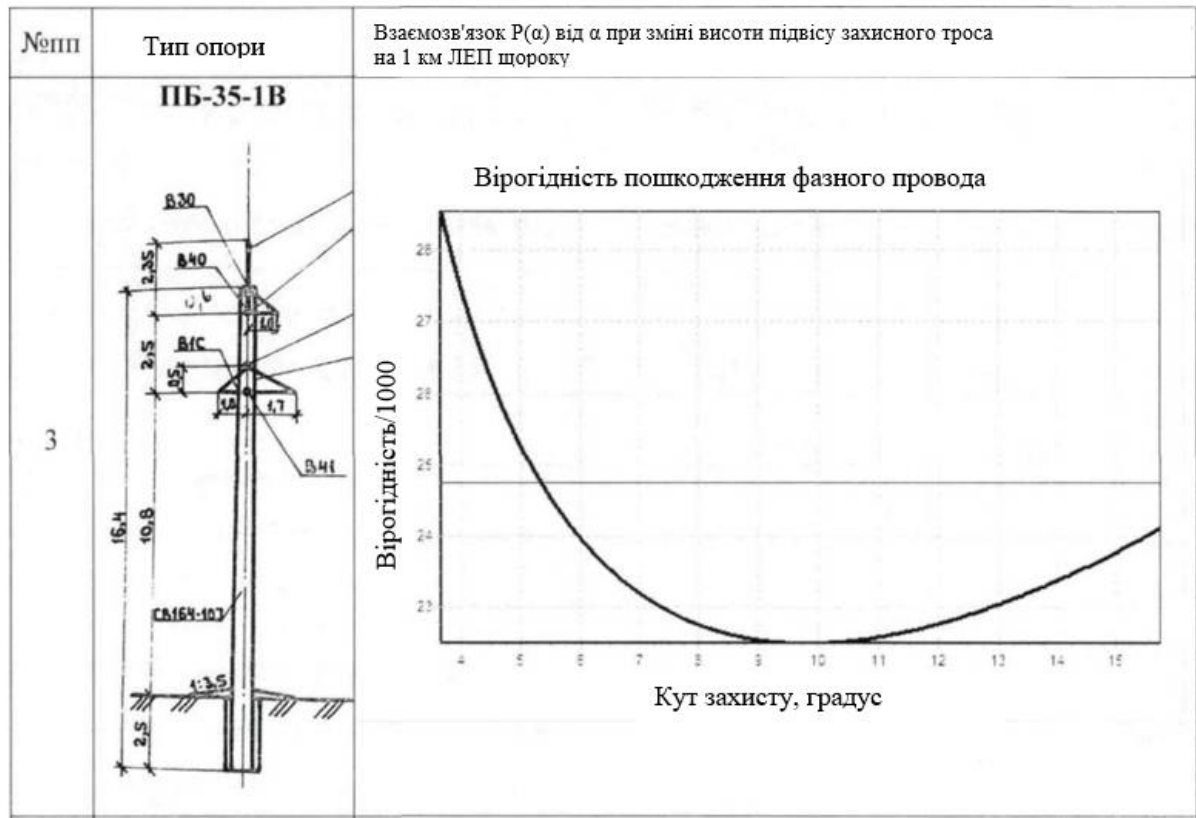
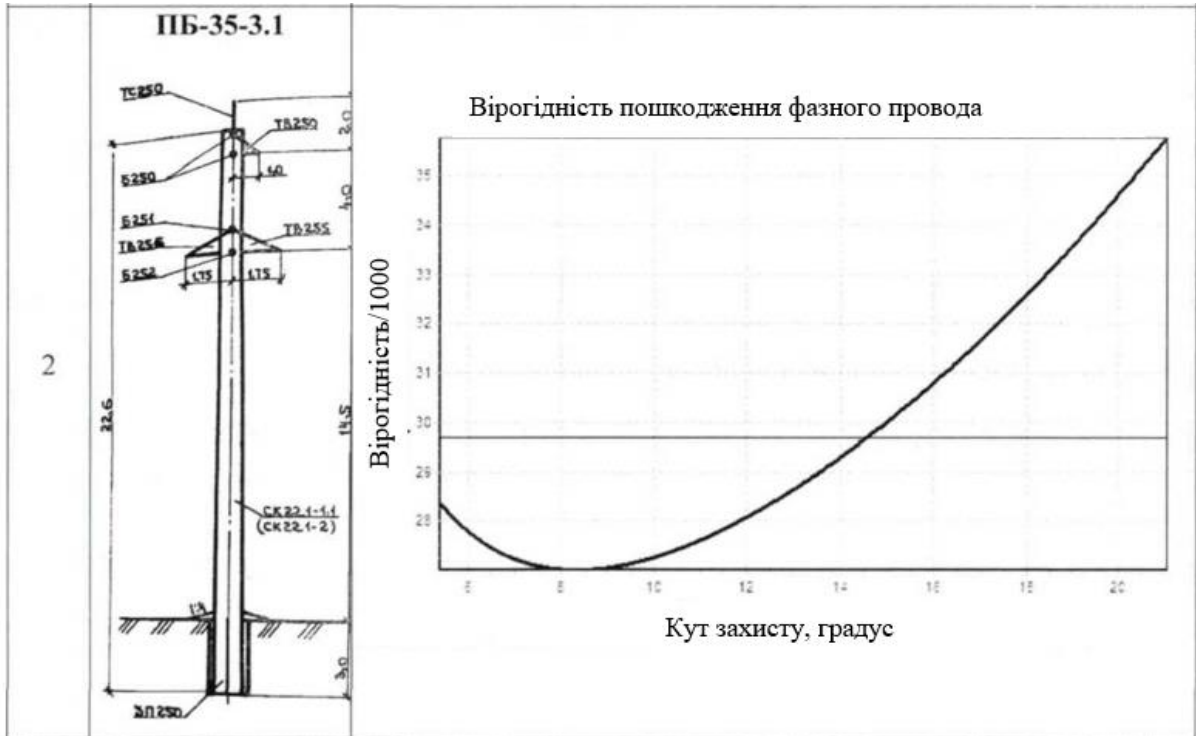
Для різних типів опор мінімальна ймовірність відповідає різним

значенням грозозахисного кута. У таблиці 3.2 подано зведені підсумки розрахунків ймовірності ушкодження верхнього фазного проводу, які виникають внаслідок зміни висоти підвішування грозозахисного троса.

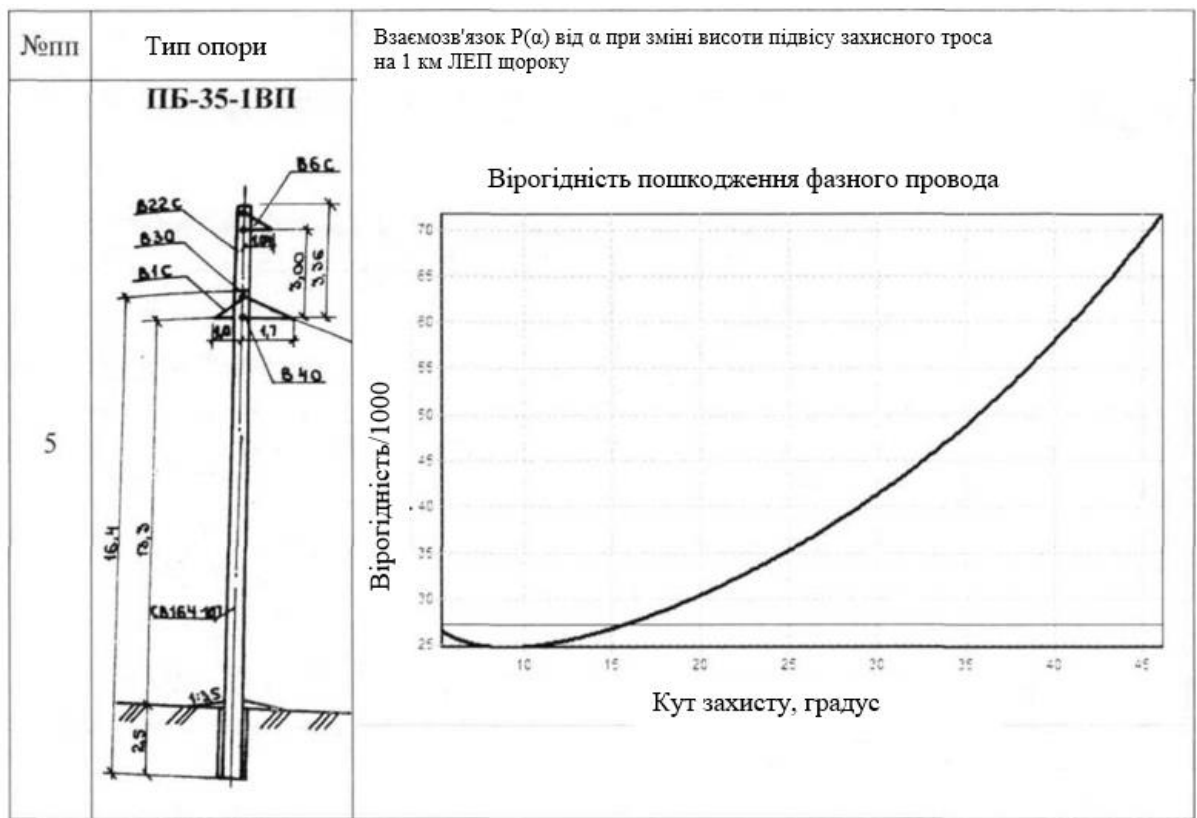
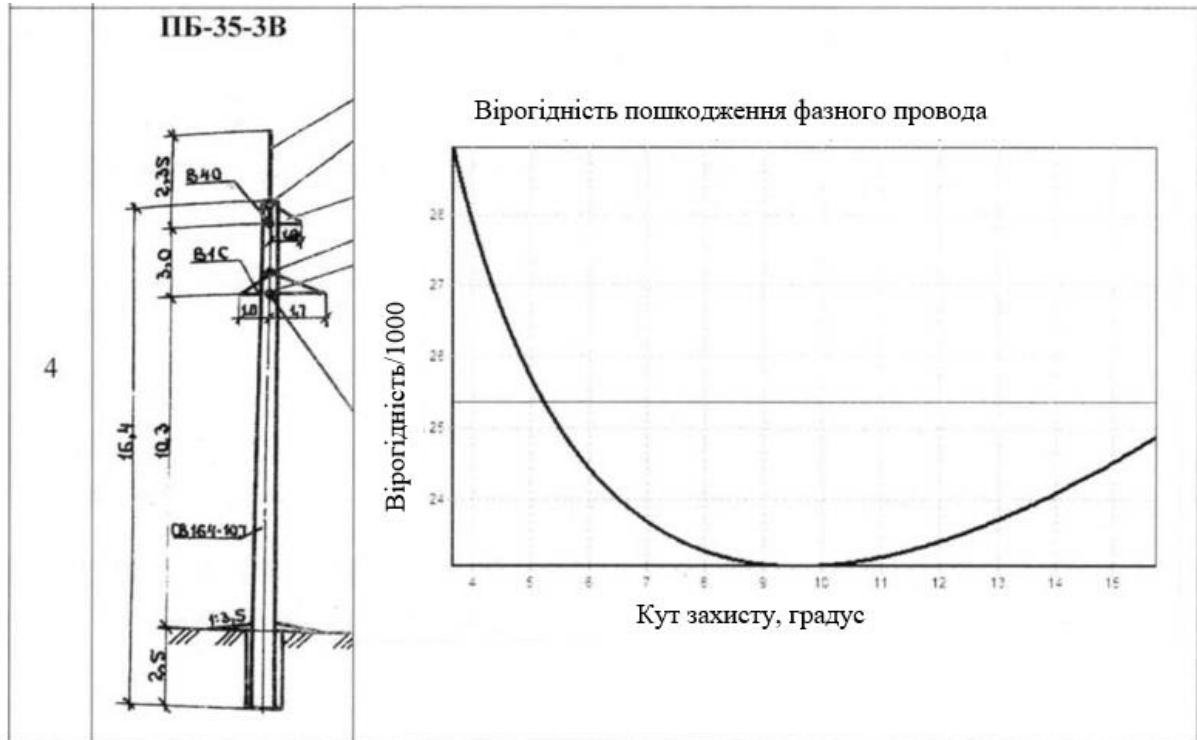
Таблиця 3.1 Взаємозв'язок імовірності пошкодження верхнього фазного проводу $P(\alpha)$ з кутом захисту троса α при змінній висоті тросового захисту



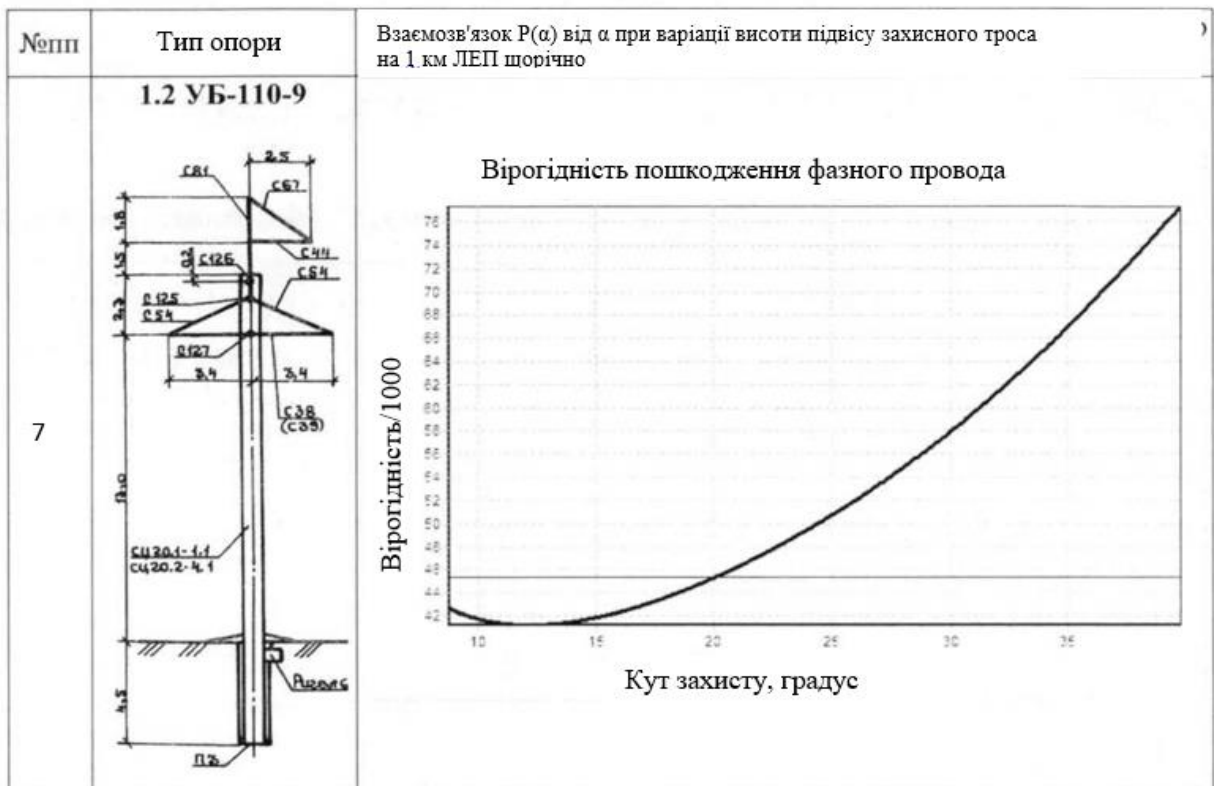
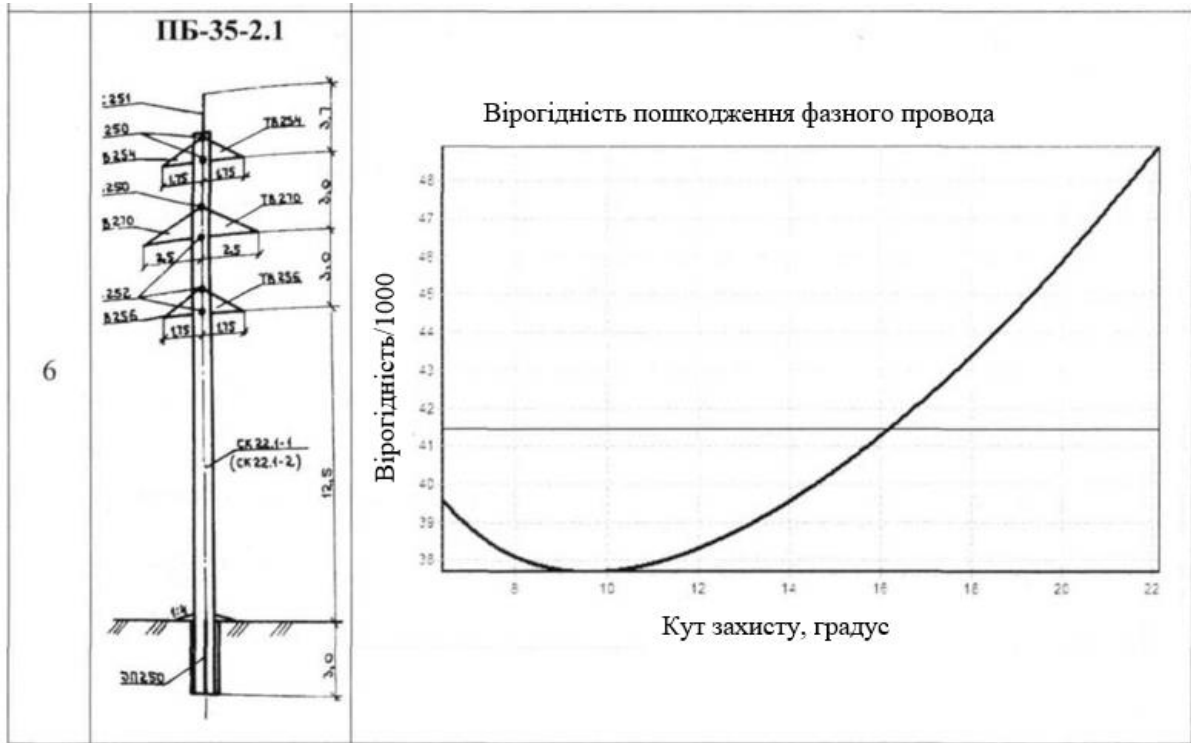
Продовження таблиці 3.1



Продовження таблиці 3.1



Продовження таблиці 3.1



Таблиця 3.2 Ймовірність пошкодження фазного проводу ЛЕП із грозозахисним тросом ($P(\alpha)$) при зміні кута тросового захисту за рахунок зміни висоти підвісу троса (висоти тросостійки на величину Δh)

Тип опори	35 -110 кВ								
	$P_0(\alpha_0)$ при стандартній висоті*1000	$P(23^\circ)*1000$	$P_{\min}*1000$ при α_{\min}	$\alpha_{\min}, ^\circ$	$P(23^\circ)/P_0(\alpha_0), \%$	$P_{\min} P_0(\alpha_0), \%$	$\alpha_0, ^\circ$	Δh при $\alpha=23^\circ, \text{ м}$	Δh при $\alpha_{\min}, \text{ м}$
ПБ-35-1.1	48,2	-	25,8	8,6	-	53,7	21,4	2,3	6,5
ПБ-35-3.1	24,2	-	22,6	9,9	-	93,3	21,4	2,3	5,8
ПБ-35-1В	25,7	-	22,6	9,9	-	87,5	15,7	2,3	5,8
ПБ-35-3В	24,8	-	23,1	9,69	-	92,8	15,7	2,3	5,9
ПБ-35-1ВП	71,7	33,3	24,7	9,1	46,3	34,5	46,2	2,3	6,4
ПБ-35-2.1	48,9	-	37,8	9,6	-	77,1	22,2	4,1	10,3
ПБ-35-4.1	54,3	-	40,3	9,2	-	74,1	22,2	4,1	10,9
1.2УБ-35-2	56,4	47,3	37,8	10,8	83,5	67,2	29,1	4,7	10,5
2ПСБ-35-1	38	34,8	29,7	13	91,7	78,5	26,6	4,1	8,2
УБ-35-110-11	82	49,4	41,8	13,2	60,1	50,9	40,7	5,9	11,7
ПВГ-35-1.1	60,6	50,2	48,5	17,1	82,7	79,9	35,5	9,4	13,1
УБ-110-7	73,6	46,7	40,3	12,5	63,3	54,7	39,7	5,9	11,4
УБ-110-9	73,6	46,7	40,3	12,5	63,3	54,7	39,7	5,9	11,4
УСБ-110-5	80,9	54,1	40,4	11,4	66,7	54,8	36,4	5,9	12,5
ПУСБ-110-11	58,5	51,4	44,5	12,7	87,8	76,1	28,4	6,7	12,6
ПБ-110-11	53,3	42,5	35,3	11,6	79,7	66,5	31,3	4,8	9,9
ПБ-110-13	53,3	42,5	35,3	11,6	79,7	66,5	31,3	4,8	9,9
ПБ-110-15	60,7	46,5	37,5	10,9	76,3	61,7	32,2	4,8	10,5

Продовження таблиця 3.2.

Тип опори	35 -110 кВ								
	$P_0(\alpha_0)$ при стандартній висоті*1000	$P(23^\circ)*1000$	$P_{\min}*1000$ при α_{\min}	$\alpha_{\min}, ^\circ$	$P(23^\circ)/P_0(\alpha_0), \%$	$P_{\min}/P_0(\alpha_0), \%$	$\alpha_0, ^\circ$	Δh при $\alpha=23^\circ, \text{м}$	Δh при $\alpha_{\min}, \text{м}$
ПБ-110-4	57,6	53,3	40,9	10,1	92,4	70,9	25,5	4,8	11,4
12УБ-110-5	116,9	55,4	44,8	11,2	47,3	38,5	46,2	5,9	12,7
12УБ-110-7	97,8	47,1	10,4	12,4	48,2	41,5	39,9	5,9	11,4
12УБ-110-3	66,5	45,1	39,4	12,8	67,7	59,2	38,2	5,9	11,1
УБ-110-13	66,4	49,3	40,7	11,5	74,1	61,2	33,4	5,5	11,5
УСБ-110-2	61,7	59,7	55,2	14,7	96,6	89,4	24,8	9,5	15,2
УБ-110-2	52,6	49,7	40,3	11,1	94,2	76,6	25,2	5,2	11,3
УСБ-110-19	78,1	47,9	39,4	11,4	61,3	50,5	36,3	5,2	11,1
ПБ-110-12	60,8	53,3	40,9	10,1	87,5	67,1	27,2	4,8	11,4
ПБ-110-16	68,3	59,2	43,5	9,5	86,5	63,7	27,2	4,8	12,1
ПБ-110-8	51,5		41,5	9,9		80,5	21,2	4,8	11,6
2ПСБ-110-1	35,6	33,9	30,4	13,4	95,1	85,3	25,5	4,8	8,5
УСБ-110-23	76,1	53,2	43,9	11,5	69,6	57,6	35,2	5,9	12,4
12УБ-110-2	61,8	49,3	40,1	11,2	79,7	64,9	30,8	5,2	11,3
12УБ-110-9	77,4	48,4	41,3	12,2	62,4	53,3	39,9	5,9	11,6

Як видно з таблиці 3.2, для кожного типу опор, що розглядаються, оптимальні значення кутів захисту є індивідуальними. Оскільки проведено аналіз і для базового положення тросостійки, можна помітити, що низка опор класу 35 кВ мають кут захисту за початкової висоти тросостійки менший, ніж рекомендоване ПУЕ значення — 23° .

З проведених розрахунків визначено, що найменший кут захисту для опор 35 кВ дорівнює $8,65^\circ$ (ПБ-35-1.1). При цьому вірогідність ураження фазного проводу за мінімального кута захисту стосовно імовірності ураження при початковій висоті тросостійки становить 46%.

Беручи до уваги, що для забезпечення мінімального кута тросового захисту на опорах з класом напруги 35 кВ потрібно суттєво збільшувати висоту тросостійки, що в більшості випадків є економічно недоцільним і не завжди призводить до істотного підвищення рівня захисту, доцільно підходити до вибору цього методу для опор 35 кВ в індивідуальному порядку.

Як і для опор 35 кВ, захисні кути на опорах із класом напруги 110 кВ також визначаються індивідуально. Водночас, встановлений кут захисту при стандартній висоті тросостійки не співпадає з рекомендованим значенням у 23° , запропонованим ПУЕ, і, наприклад, для опори 1.2 УБ-110-5 може перевищувати цей показник удвічі.

Застосування підходу зі зменшенням кута за рахунок підвищення тросостійки дозволяє практично удвічі скоротити кут захисту порівняно із стандартним кутом у 23° , а ймовірність ураження фазного проводу можна зменшити більше, ніж на 26%.

Отже, для більшості опор класу напруги 35 кВ захисний кут менший за рекомендоване ПУЕ значення 23° , і ймовірність пошкодження фазного проводу при цьому мінімальному захисному куті приблизно вдвічі нижча, ніж за стандартних умов.

Для опор, що працюють на напрузі 110 кВ, кут захисту при типовому положенні тросостійки становить близько 30° . При зменшенні його до 23° ,

ймовірність пошкодження фазного проводу щодо початкового значення ймовірності зменшується у діапазоні від 2 до 20%. Зростання висоти тросостійки дало можливість знизити захисний кут i , відповідно, зменшити ризик ураження фазного проводу.

У дослідженні для кожного типу опор були визначені оптимальні значення кутів тросового захисту та найкращі параметри збільшення висоти тросостійки щодо стандартної конфігурації тросостійки, за яких ймовірність проникнення грозових перенапруг на підстанцію мінімальна.

Таким чином, отримані результати засвідчують ефективність запропонованого методу зменшення кута захисту за рахунок підняття тросостійки для зниження ймовірності пошкодження фазного проводу на опорах з класом напруги 35-110 кВ.

3.2. Підсумки обчислень ймовірності виникнення пошкодження фазного проводу за умови зміни розташування гірлянди ізоляторів на траверсі

Вивчення методу зміни ймовірності утворення пошкодження фазного проводу при різних розташуваннях гірлянди ізоляторів на траверсі дозволяє визначити:

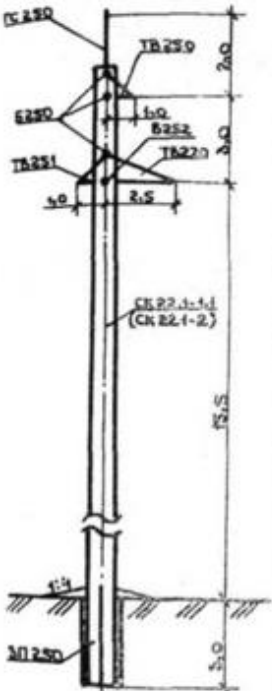

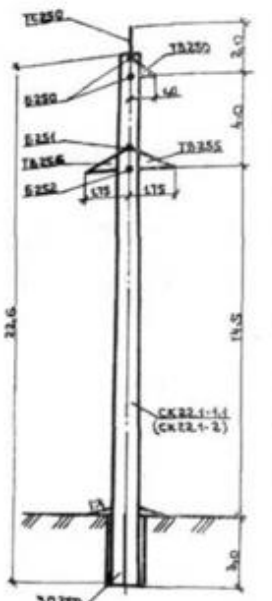
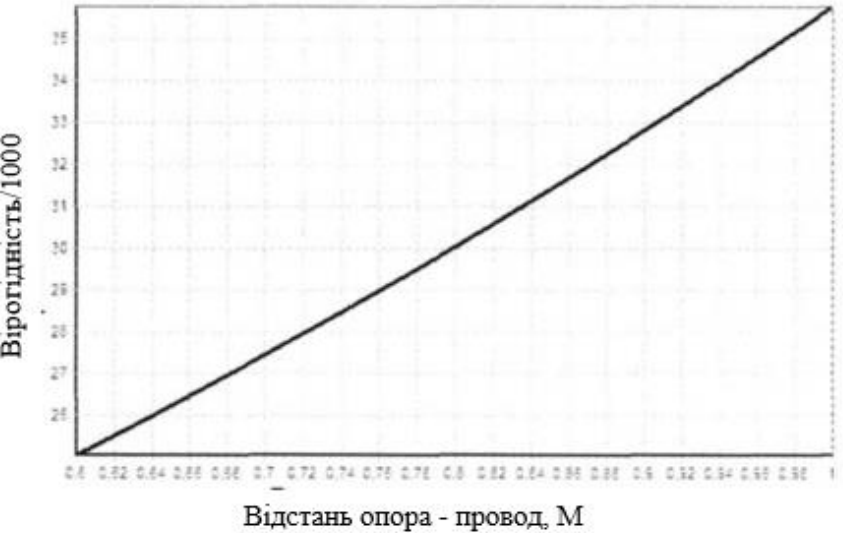
- ймовірність появи пошкодження фазного проводу при початковому розташуванні гірлянди ізоляторів на траверсі;
- значення кута захисту у випадку стандартного розміщення гірлянди ізоляторів на траверсі;
- ймовірність виникнення пошкодження фазного проводу при мінімально можливому куті захисту;
- відстань між опорою та проводом, при якій ймовірність ушкодження фазного проводу найменша.

Крім того, виконано аналіз та зіставлення здобутих результатів.

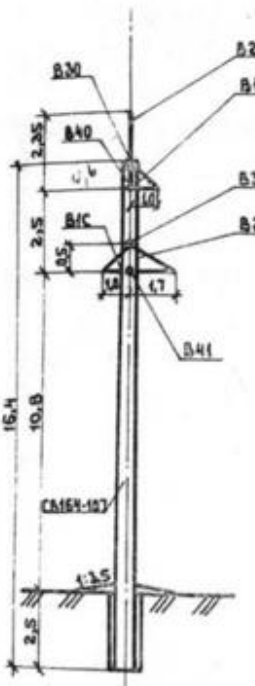
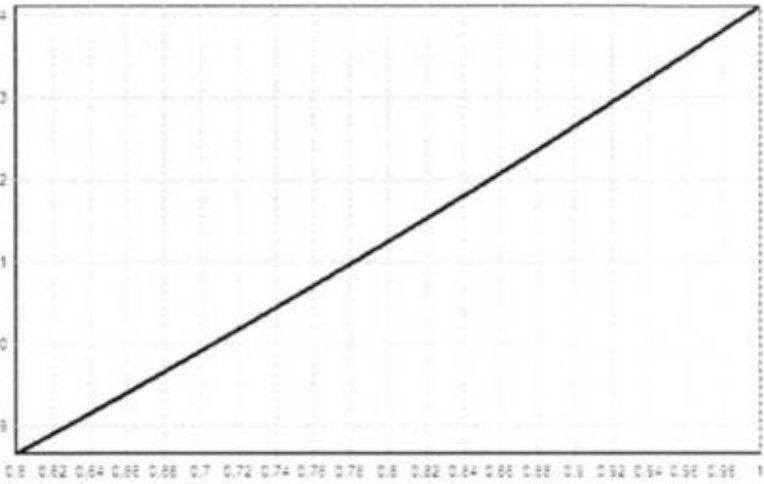
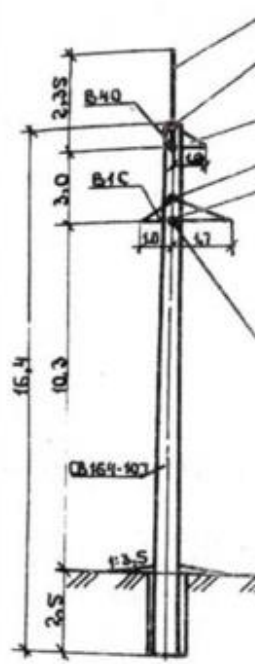
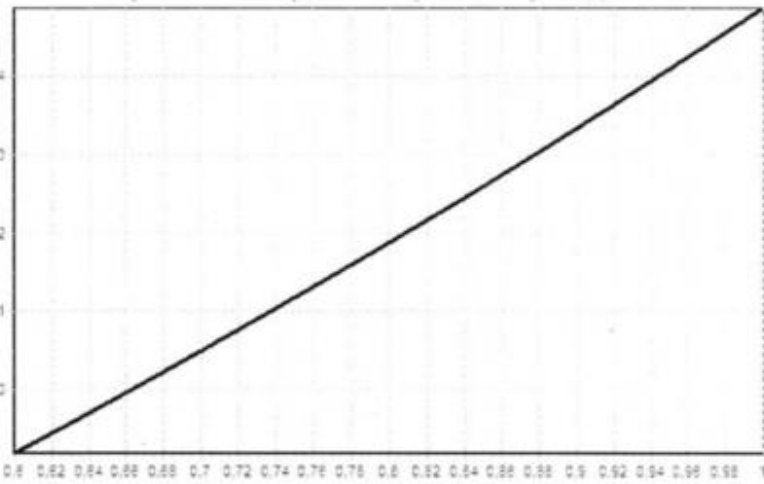
Дані моделювання наведено у таблиці 3.3 у формі графіків ймовірностей виникнення пошкодження фазного проводу на 1 км протяжності лінії протягом одного сезону грози. У таблиці подані типові конструкції опор для класів напруги 35 і 110 кВ, стосовно яких виконували обрахунки, а також представлені залежності ймовірності появи пошкоджень фазного проводу від розміщення гірлянди ізоляторів на траверсі. Значення кута тросового захисту при цьому змінюється відповідно до положення гірлянди на траверсі.

У таблиці 3.4 зібрані результати максимальної довжини зміщення гірлянди ізоляторів по траверсі в напрямку до опори та зміни відсоткового відхилення отриманої ймовірності відносно початкової.

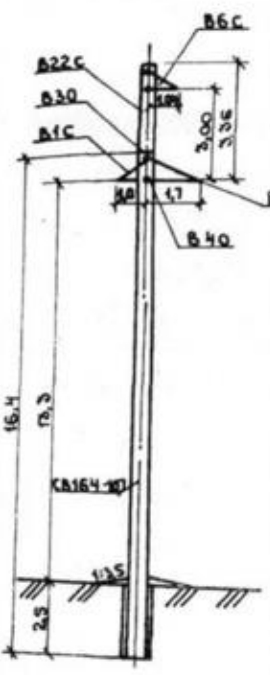
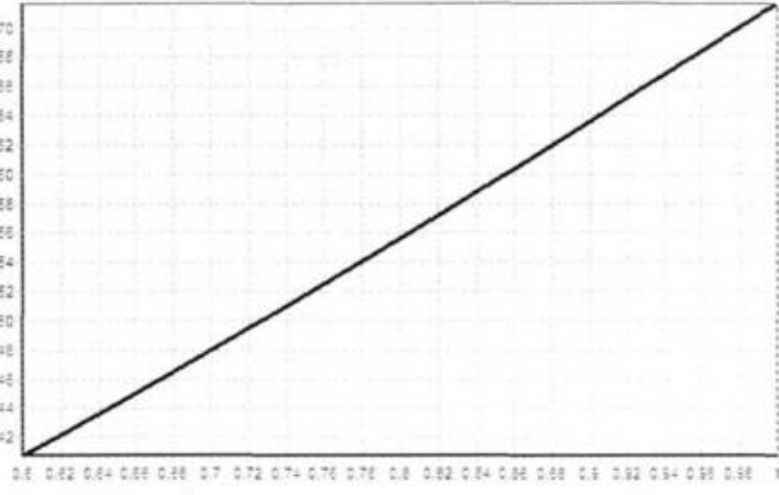
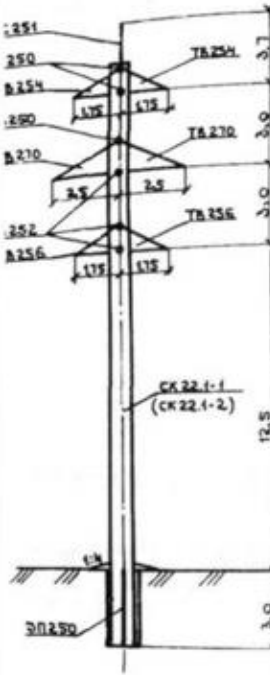
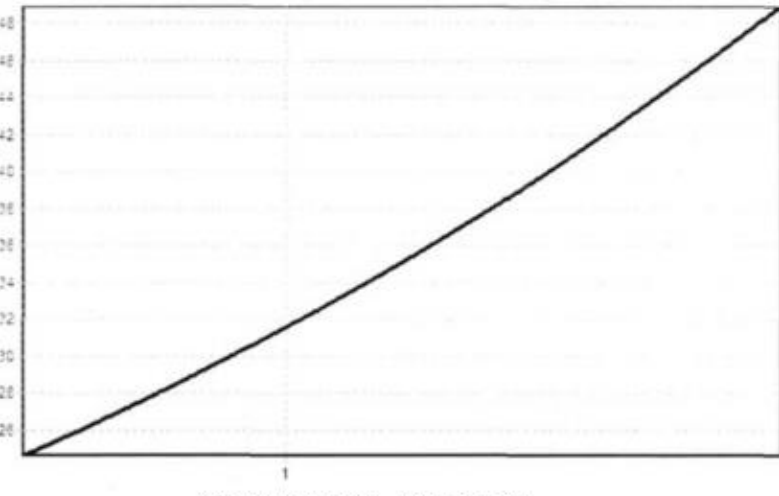
Таблиця 3.3 Ймовірність пошкодження фазного проводу на 1 км протяжності лінії протягом року при зміні місця розташування гірлянди ізоляторів на тросі

№шп	Тип опори	Залежність $P(\alpha)$ від положення гірлянди ізоляторів на траверсі
1	<p style="text-align: center;">ПБ-35-1.1</p> 	<p style="text-align: center;">Вірогідність пошкодження фазного проводу</p>  <p style="text-align: center;">Відстань опора - провід, М</p>
2	<p style="text-align: center;">ПБ-35-3.1</p> 	<p style="text-align: center;">Вірогідність пошкодження фазного проводу</p>  <p style="text-align: center;">Відстань опора - провід, М</p>

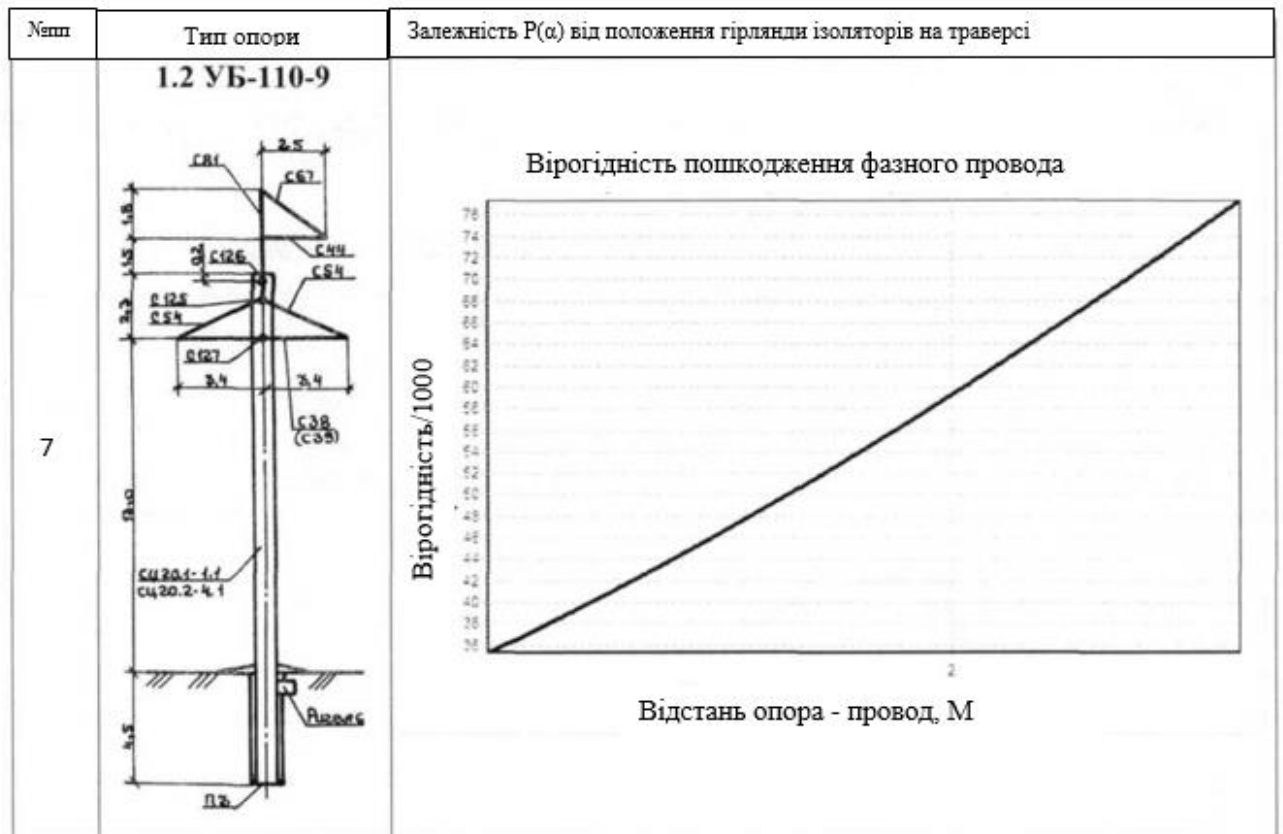
Продовження таблиці 3.3

№пп	Тип опори	Залежність $P(\alpha)$ від положення гірлянди ізоляторів на траверсі
3	<p style="text-align: center;">ПБ-35-1В</p> 	<p style="text-align: center;">Вірогідність пошкодження фазного провoda</p>  <p style="text-align: center;">Відстань опора - провід, М</p>
4	<p style="text-align: center;">ПБ-35-3В</p> 	<p style="text-align: center;">Вірогідність пошкодження фазного провoda</p>  <p style="text-align: center;">Відстань опора - провід, М</p>

Продовження таблиці 3.3

№№пп	Тип опори	Залежність $P(\alpha)$ від положення гірлянди ізоляторів на траверсі
5	<p>ПБ-35-1ВП</p> 	<p>Вірогідність пошкодження фазного провода</p>  <p>Відстань опора - провід, М</p>
6	<p>ПБ-35-2.1</p> 	<p>Вірогідність пошкодження фазного провода</p>  <p>Відстань опора - провід, М</p>

Продовження таблиці 3.3



Таблиця 3.4 Ймовірність пошкодження фазного провoda ЛЕП із грозозахисним тросом ($P(\alpha)$) за рахунок зміни положення гірлянди ізоляторів на траверсі (відстані гірлянда-опора на величину Δh).

Тип опори	$P_0(\alpha_0)$ за нормального розташування гірлянди ізоляторів на траверсі/1000	$P_{\min} * 1000$ при α_{\min} ,	$\alpha_{\min}, ^\circ$	$\Delta h_{\max}, \text{М}$	P_{\min} при $\alpha_{\min}, \%$	$\alpha_0, ^\circ$
ПБ-35-1.1	37,8	18,8	9,8	0,5	49,5	21,1
ПБ-35-3.1	35,8	25,1	13,1	0,5	70,1	21,1
ПБ-35-1В	24,2	18,7	9,6	0,5	77,4	15,8
ПБ-35-3В	24,9	19,2	9,6	0,5	77,2	15,8
ПБ-35-1ВП	71,7	40,1	31,1	0,5	56,9	46,2
ПБ-35-2.1	48,8	24,7	7,8	1,2	50,4	22,2
ПБ-35-4.1	54,4	26,8	7,8	1,2	49,2	22,1
1.2УБ-35-2	56,5	23,1	9,5	1,5	40,9	29,1
2ПСБ-35-1	37,8	18,9	9,8	1,2	49,5	26,6
УБ-35-110-11	81,8	22,8	11,7	1,8	27,8	40,9

Продовження таблиці 3.4

Тип опори	$P_0(\alpha_0)$ за нормального розташування гірлянди ізоляторів на траверсі/1000	$P_{\min} * 1000$ при α_{\min} ,	$\alpha_{\min}, ^\circ$	$\Delta h_{\max}, M$	P_{\min} при $\alpha_{\min}, \%$	$\alpha_0, ^\circ$
ПВГ-35-1.1	60,6	17,2	6,2	3,5	28,4	35,6
УБ-110-7	73,7	33,8	21,9	1,4	48,1	39,9
УБ-110-9	73,7	33,8	21,9	1,4	48,1	39,9
УСБ-110-5	80,8	37,3	19,5	1,4	45,8	36,4
ПУСБ-110-11	58,5	28,7	12,8	1,7	48,8	28,4
ПБ-110-11	53,3	32,7	19,8	0,9	61,3	31,3
ПБ-110-13	53,3	32,7	19,8	0,9	61,3	31,3
ПБ-110-15	60,7	36,4	20,6	0,9	59,9	32,1
ПБ-110-4	57,6	36,4	15,8	0,9	63,1	25,5
12УБ-110-5	116,9	48,4	26,6	1,4	41,4	46,2
12УБ-110-7	97,8	42,2	28,7	1,4	43,1	39,7
12УБ-110-3	66,5	31,6	20,6	1,4	47,5	38,1
УБ-110-13	66,4	34,7	18,8	1,2	52,2	33,4
УСБ-110-2	61,7	26,9	7,8	2,9	42,9	24,8
УБ-110-2	52,6	31,7	14,4	1,1	60,1	25,1
УСБ-110-19	78,1	39,8	23,8	1,1	51,2	36,3
ПБ-110-12	60,8	37,6	17,2	0,9	61,8	27,2
ПБ-110-16	68,3	41,5	17,2	0,9	60,8	27,2
ПБ-110-8	51,5	34,5	12,8	0,9	66,9	21,1
2ПСБ-110-1	35,6	23,8	15,8	0,9	67,4	25,5
УСБ-110-23	76,1	35,8	18,7	1,4	46,8	35,2
12УБ-110-2	61,8	34,4	17,8	1,1	55,7	30,8
12УБ-110-9	77,4	35,3	21,9	1,4	45,7	39,9

Зміщення гірлянди ізоляторів ближче до траверси веде до зменшення кута захисту тросом і знижує ймовірність ушкодження фазного проводу у середині прольоту. Водночас ймовірність повторного перекриття за зміщення залишається майже незмінною до певної критичної відстані, після чого різко зростає через підвищення ймовірності перекриття від опори до проводу, а не тільки від траверси.

У конструкціях з короткими траверсами, головним чином для опор напруги 35 кВ, зміщення гірлянди ізоляторів практично неможливе. Для ліній 110 кВ із довшими траверсами, зміщення підвісної гірлянди по траверсі до опори в межах допустимого може бути дієвим способом підвищення стійкості ЛЕП до грозових впливів.

Як вже було зазначено, для більшості розглянутих опор класу 35 кВ кут захисту при типовому розташуванні гірлянди на траверсі та висоті тросостійки менший за рекомендоване значення ПУЕ - 23° .

Як свідчить таблиця, перенесення гірлянди ізоляторів ближче до опори дає змогу суттєво зменшити ймовірність ушкодження фазного проводу у порівнянні зі стандартним положенням гірлянди ізоляторів на траверсі. Навіть невелике зміщення помітно зменшує кут захисту, наприклад для ПБ-35-1.1 при початковому куті захисту $21,04^\circ$, зміщення на 0,4 м призводить до зниження кута захисту до $9,73^\circ$.

Під час дослідження опор класу 110 кВ, у яких кут захисту значно перевищує рекомендований ПУЕ у порівнянні з опорами 35 кВ, такий підхід до мінімізації кута захисту не потребує великих капіталовкладень і є оптимальним. При зміні положення гірлянди досягається значення кута, набагато менше 23° . Наприклад, для ПБ-110-4 при зміщенні гірлянди на 0,8 м досягнуто мінімального кута $15,95^\circ$, а ймовірність ушкодження фазного проводу на відміну від вихідного розташування гірлянди на траверсі зменшилася більш ніж на 30%.

Із таблиці 3.4 видно, що для більшості опор класу 35-110 кВ гірлянди можна зміщати на відстань, яка дорівнює її довжині. Однак навіть таке зміщення дає суттєве зменшення ймовірності ушкодження фазного проводу у порівнянні з початковою ймовірністю при типовому положенні гірлянди ізоляторів на траверсі.

У підсумку для кожного з розглянутих типів опор визначені оптимальні параметри кута тросового захисту і найкращі відстані зміщення гірлянди ізоляторів від стандартної позиції на траверсі до опори, при яких ймовірність проникнення хвиль грозових перенапруг на підстанцію буде найменшою.

Отримані дані дають можливість стверджувати, що запропонована методика зменшення кута захисту шляхом зсуву гірлянди ізоляторів по траверсі у бік опори довела свою ефективність для зниження ймовірності ушкодження фазного проводу на опорах з класом напруги 35-110 кВ.

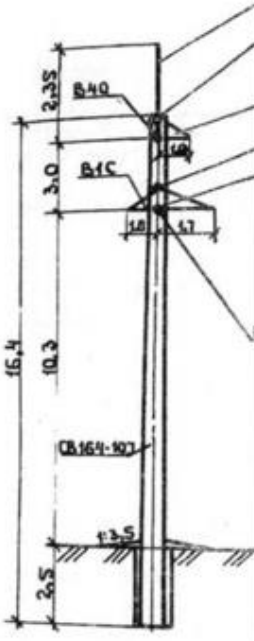

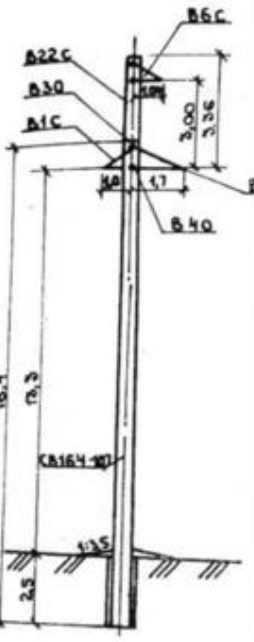

Варто зауважити, що в процесі застосування описаних способів для зменшення ймовірності пошкодження фазного проводу необхідно брати до розгляду і ймовірність виникнення зворотного перекриття лінійної ізоляції.

3.3. Підсумки обчислень ймовірності зворотного перекриття лінійної ізоляції

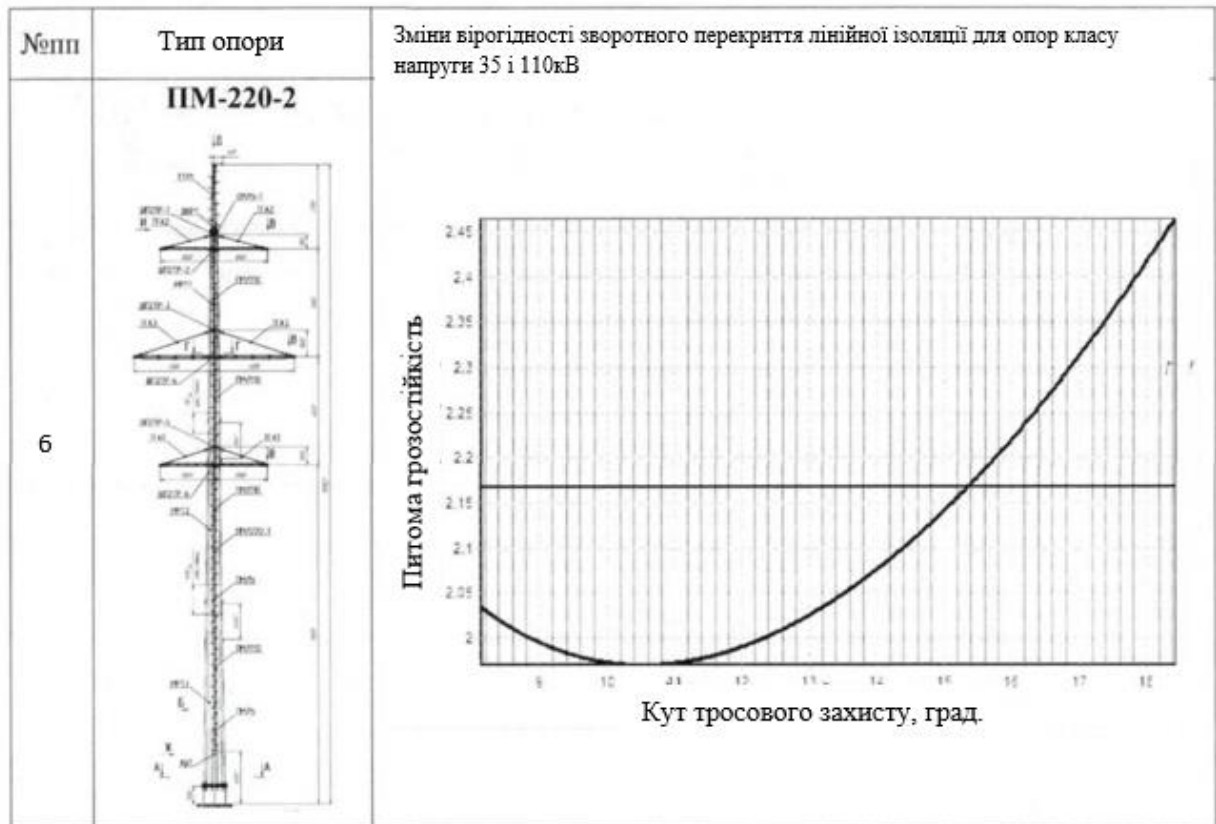
Для аналізу вірогідності зворотного перекриття була розроблена програма, яка дозволила визначити наступні параметри:

- ймовірність зворотного перекриття лінійної ізоляції;
- відносна грозостійкість при зсуві гірлянди ізоляторів по траверсі порівняно з початковим положенням гірлянди;
- відносна грозостійкість при зміні висоти тросостійки відносно її стандартного положення при куті захисту 23° ;

Продовження таблиці 3.5

№пп	Тип опори	Зміни вірогідності зворотного перекриття лінійної ізоляції для опор класу напруги 35 і 110кВ
4	<p style="text-align: center;">ПБ-35-3В</p> 	<p style="text-align: center;">Зміна вірогідності зворотного перекриття лінійної ізоляції для опор класу напруги 35 і 110кВ</p> <p style="text-align: center;">Питома грозостійкість ЛЕП</p> 
5	<p style="text-align: center;">ПБ-35-1ВП</p> 	<p style="text-align: center;">Питома грозостійкість ЛЕП</p> 

Продовження таблиці 3.5



Таблиця 3.6. Імовірність зворотного перекриття лінійної ізоляції для опор класу напруги 35-220 кВ і зміни відносної грозостійкості ПЛЕП

Тип опори	$W_0(t)$	$W_{\min}(t)$	$d\omega(t), \%$	$\alpha_{\min}, ^\circ$	$P_{\text{ср}}, \text{МВт}$	$T_{\text{ср}}, \text{год.}$	$S_{\text{пит.}}, \text{тис. грн}$
ПБ-35-1.1	5,4	4,9	9,5	31	29	11	358
ПБ-35-3.1	5,7	5,3	7,2	31	29	11	289
ПБ-35-1В	5,3	4,2	21,2	38	31	11	793
ПБ-35-3В	5,5	4,4	20,4	38	31	11	793
ПБ-35-1ВП	6,8	4,7	31,4	35	31	11	1514
ПБ-35-2.1	5,9	4,8	16,8	38	31	11	722
ПБ-35-4.1	6,2	5,4	13,2	36	31	11	577
1.2УБ-35-2	5,2	4,6	11,8	43	31	11	435
2ПСБ-35-1	5	3,6	12,6	48	31	11	362
УБ-35-110-11	4,8	4,6	2,2	48	31	11	73
ПВГ-35-1.1	6,2	3,2	49,2	57	31	11	2158

Продовження таблиці 3.6

Тип опори	$W_0(t)$	$W_{\min}(t)$	$d\omega(t)$, %	α_{\min} , °	$P_{\text{ср}}$, МВт	$T_{\text{ср}}$, год.	$S_{\text{пит.}}$, тис. грн
УБ-110-7	6,5	6,3	3,2	49	76	15	425
УБ-110-9	6,5	6,3	3,2	49	76	15	425
УСБ-110-5	7,6	7,3	4,1	45	76	15	632
ПУСБ-110-11	5,8	4,8	14,1	43	76	15	1686
ПБ-110-11	6	4,8	2,2	38	76	15	214
ПБ-110-13	6	4,8	2,1	36	74	15	212
ПБ-110-15	5,4	5,4	0,76	36	74	15	85
ПБ-110-4	6,4	5,8	6,4	34	74	15	842
12УБ-110-5	5,8	5,6	3,6	39	74	15	422
12УБ-110-7	4,8	4,8	4,1	42	74	15	422
12УБ-110-3	4,7	4,6	2,2	42	74	15	212
УБ-110-13	5,2	5,2	0,98	42	74	15	106
УСБ-110-2	3,3	2,9	12,6	36	74	15	842
УБ-110-2	5,8	5,4	10,2	37	74	15	1257
УСБ-110-19	6,8	6,8	1,5	43	74	15	212
ПБ-110-12	6,2	5,8	3,4	38	74	15	423
ПБ-110-16	9,2	8,7	5,5	37	74	15	1054
ПБ-110-8	3,5	3,4	2,8	25	74	15	212
2ПСБ-110-1	2,5	2,3	8,4	33	74	15	421
УСБ-110-23	5,4	5,4	0,75	39	74	15	85
12УБ-110-2	5,8	5,3	11,9	37	74	15	1468
12УБ-110-9	5,5	5,1	9,3	41	74	15	1048

У табл. 3.6 використовуються такі позначення:

$\omega_0(t)$ - питомий потік грозових відмов у разі звичайного розміщення тросостійки; $\omega_{\min}(t)$ - найменша кількість відключень ЛЕП через атмосферну грозову активність;

$$d\omega(t) = \frac{\omega_0(t) - \omega_{\min}(t)}{\omega_0(t)} \cdot 100\% \quad - \quad \text{зміна питомого потоку грозових}$$

відключень ПЛЕП, %;

α_{\min} - кут тросового захисту, при якому число грозових відключень ЛЕП є мінімальним;

P_{cp} , МВт - усереднена потужність, що передається по ПЛЕП;

t_{cp} , година - усереднений час відновлення експлуатації ПЛЕП (тривалість вимушеного простою);

S_{num} , тис.грн - питомий економічний ефект, отриманий за рахунок зменшення часу простою лінії та скорочення втрат від недовідпуску електроенергії;

$$t = 1 \text{ рік}$$

$$S_{num} = \frac{P_{cp}(t) \cdot d\omega(t) \cdot \omega_0(t) \cdot S_{EE}}{100}$$

де $S_{EE} = 2,915$ грн/кВтхгод. - собівартість електроенергії.

Аналіз одержаних графіків ймовірності повторного перекриття ізоляції на опорах для класів напруги 35-220 кВ і динаміки зміни відносної грозостійкості ПЛЕП продемонстрував, що застосування рекомендованих способів підвищення грозостійкості ЛЕП 35-220 кВ для опор 35 кВ приводить до приросту питомої грозостійкості порівняно зі стартовим значенням на 7,14% для опори ПБ-35-3.1, а для ПБ-35-1ВП –

на 31,34%. Для конструкцій 110 кВ питома грозостійкість зросла на 12,5% (УСБ-110-2) та на 2% (ПБ-110-11). Для аналізованої опори ПМ-220-2, що розташована на підході до електрометалургійного комплексу, показник питомої грозостійкості збільшився на 37,8% відносно початкового значення, а оптимальний захисний кут становив $10,5^\circ$.

Виходячи з наведеного, можна зробити висновок, що запропоновані заходи щодо зменшення захисного кута шляхом підвищення висоти тросостійки та корегування положення гірлянди на траверсі забезпечують підвищення питомої грозостійкості повітряних ліній стосовно вихідних параметрів визначених опор.

ВИСНОВКИ

У наданій роботі проведені дослідження впливу грозових розрядів на надійність електропостачання споживачів.

Найбільш ефективними для підвищення грозостійкості ЛЕП є комплексні гібридні рішення (трос+ОПН), струмообмежуючі реактори, багаторівневі мережеві заземлення та адаптивні системи автоматизованого керування. Вони особливо важливі для ЛЕП 220 кВ і вище, а також для ключових вузлів, підстанцій, об'єктів критичної інфраструктури.

Перспективним напрямком є вдосконалення норм та стандартів з урахуванням світових тенденцій та кліматичних викликів для електроенергетики України.

Подальші дослідження доцільно спрямовувати на адаптацію існуючих технологій до локальних умов, розвиток автоматизації та інтеграцію цифрових систем діагностики й управління ризиком грозових перенапруг.

У результаті проведених розрахунків та розробок, спрямованих на підвищення надійності електропостачання електротехнічних комплексів під час грозових впливів, було отримано такі підсумки:

- удосконалено методику визначення ймовірності прориву блискавки крізь тросовий захист залежно від його кутових параметрів. На основі цієї методики сформовано підхід до встановлення оптимальних значень кутів тросового захисту, який передбачає коригування висоти тросостійки та зміну положення ізоляторної гірлянди на траверсі;

- за результатами розрахунків оптимальних кутів тросового захисту, виконаних для понад 30 типових конструкцій опор, виявлено, що раціональні значення цих кутів для ПЛЕП є індивідуальними для кожного типу опори й саме при них досягається мінімальна кількість грозових відключень. Економічний ефект, отриманий лише за рахунок скорочення часу простою ПЛЕП, може становити від кількох сотень тисяч до декількох мільйонів гривень щороку.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сегеда М. С. Математичне моделювання в електроенергетиці: навч. посіб. / Сегеда М. С. – Львів:, 2002. – 300 с. 2. Сулейманов В.М., Кацадзе Т.Л. Електричні мережі і системи. –К.:НТУУ «КПІ», 2008. – 456 с.
2. Сегеда М. С. Математичне моделювання хвильових та електромагнетних процесів в електроенергетичних системах: монографія / Сегеда М. С. – Львів, 2002. – 152 с.
3. Бржезицький В.О., Ісакова А.В., Рудаков В.В. та ін.. Техніка і електрофізика високих напруг: Навч. посібник / За ред. В.О. Бржезицького та В.М. Михайлова. – Харків: НТУ "ХПІ" – Торнадо, 2005. – 930с.
4. Василець С. В., Василець К. С. Техніка високих напруг: навчальний посібник [Електронне видання]. – Рівне : НУВГП, 2018. – 187 с.
5. Теоретичні основи електротехніки: підручник / В.С.Хілов. – Д.: Національний технічний університет “Дніпровська політехніка”, 433 с. 2021 рік.
6. Перхач В. С. Математичні задачі електроенергетики / В. С. Перхач. — Львов. : Вища школа, 1982. — 378 с.
7. Акімов О.І., Сушко Д.Л. Техніка високих напруг. Ізоляція та перенапруги в пристроях електропостачання і електричної тяги залізничного транспорту: Навч. посібник. – Харків: УкрДАЗТ, 2009. – 217 с.
8. МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ СИСТЕМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЮ ЕНЕРГІЄЮ [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітніх програм «Системи забезпечення споживачів електричною енергією» та «Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології» / В. А. Попов, В. В. Ткаченко, О. С. Ярмолюк ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,3 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 104 с.

9. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання : навч. посіб. / А. Ю. Орлович, П. Г. Плешков, О. А. Козловський [та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький: Лисенко В.Ф., 2019. – 272 с.

10. Шкрабець, Ф. П. Основи електропостачання : навч. посіб. / Ф. П. Шкрабець, П. Г. Плешков. - Кіровоград : РВЛ КНТУ, 2010. - 408 с.

11. Електротехнічні системи електроспоживання : [навч. посіб.] / П. Г. Плешков, В. В. Зінзура, Н. Ю. Гарасьова [та ін.]; за заг. ред. П. Г. Плешкова. - Кропивницький : ЦНТУ, 2021. – 208 с.

12. Правила улаштування електроустановок. Відокремлений підрозділ «Науково-проектний центр розвитку Об'єднаної енергетичної системи України» державного підприємства «Національна енергетична компанія «Укренерго» (НПЦР ОЕС України). Наказ Міністерства енергетики України від 21.07.2017 №476, 2017. – 617 с.

13. Кваліфікаційна робота магістра : метод. рекомендації до змісту, структури та оформлення кваліфікаційної роб. : для студ. спец. 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плешков, К. Г. Петрова, Н. Ю. Гарасьова та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 74 с.

14. ДСТУ EN 62305-1:2012 «Захист від блискавки. Частина 1. Загальні принципи».

15. IEC 60071-1, IEC 60099-4 — міжнародні стандарти по захисту ЛЕП від перенапруги.

16. Офіційні сайти провідних виробників: Siemens Energy, ABB, ТОВ «Іскра-Енерго», Hitachi Energy тощо.

17. Збірник доповідей Міжнародного енергетичного форуму INNOGRID-2024, розділи про грозостійкість ЛЕП.

ДОДАТКИ

ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ГРОЗОВИХ РОЗРЯДАХ НА ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ТА ПІДСТАНЦІЯХ

Загальні положення

Грозові розряди належать до одних із найбільш небезпечних природних явищ для персоналу, який працює на лініях електропередач і підстанціях. Ураження блискавкою або вторинними проявами грозових процесів може призвести до тяжких травм, аварійного відключення обладнання та порушення сталості електропостачання. Тому питання організації безпечних умов праці під час грози регламентується «Правилами охорони праці під час експлуатації електроустановок», ПУЕ, інструкціями підприємств та нормативами з техніки безпеки.

Метою заходів із охорони праці є запобігання ураженню електричним струмом, руйнуванню обладнання від атмосферних перенапруг та мінімізація ризиків перебування персоналу в небезпечній зоні під час грозових явищ.

Небезпечні фактори, пов'язані з грозовими розрядами

До основних небезпек, що виникають унаслідок грозових впливів, належать:

1. Прямий удар блискавки - можливе ураження людей, які перебувають на відкритих майданчиках підстанцій або працюють на опорах ЛЕП; механічне руйнування елементів обладнання, тросів, ізоляції.

2. Вторинні прояви блискавки - наведені перенапруги в колах управління та захисту; крокова та дотикова напруга, що виникає при протіканні струму блискавки через ґрунт; електромагнітна індукція в комунікаціях та кабелях.

3. Пожежонебезпечні наслідки - займання ізоляції та оливи в силових трансформаторах; руйнування обмоток устаткування.

4. Психофізіологічні фактори - стрес та дезорієнтація персоналу при інтенсивних грозових імпульсах; зниження уваги та можливість помилкових дій.

Організаційні заходи безпеки

1. Заборона виконання робіт під час грози.

Будь-які роботи на ВРП, відкритих майданчиках підстанцій, ЛЕП, ОРУ, грозотросах суворо заборонені. При наближенні грози персонал зобов'язаний негайно залишити висотні конструкції, опори та зони можливого ураження.

2. Інструктаж та навчання персоналу.

Проведення періодичних інструктажів з правил поведінки при грозі. Навчання розпізнаванню ознак наближення грози (зміна напруги повітря, звук, хмарність).

3. Контроль метеоумов.

На диспетчерських пунктах повинні бути встановлені засоби прогнозування та фіксації грозової активності. Під час проведення планових робіт обов'язкове уточнення метеорологічних прогнозів.

Технічні заходи безпеки

1. Блискавкозахист ЛЕП.

Використання тросового захисту для перехоплення блискавки.

Оптимальний вибір кута захисту та висоти тросів.

Періодична перевірка цілісності грозотросів та з'єднань.

2. Захисне заземлення та вирівнювання потенціалів. Забезпечення нормативного опору заземлювачів опор (не більше 10 Ом).

Дублювання заземлювальних провідників на аварійно небезпечних ділянках.

У підстанціях — наявність сітки вирівнювання потенціалів, що зменшує крокову напругу.

3. Обмеження перенапруг.

Установка розрядників і обмежувачів перенапруг.

Періодична перевірка та вимірювання параметрів грозозахисних пристроїв.

Фільтрація перенапруг у кабельних каналах та колах зв'язку.

4. Захист кабельних ліній.

Використання екранованих кабелів.

Заземлення оболонки кабелів з обох сторін.

Монтаж ввідних обмежувачів імпульсних перенапруг.

Вимоги до безпечної поведінки персоналу

Дії при раптовому початку грози:

- негайно зіскочити з опори чи конструкції та відійти на безпечну відстань не менше 20–30 м від ЛЕП або обладнання;

- не торкатися металевих корпусів трансформаторів, вимикачів, огорожень та трубопроводів.

Правила перебування при грозі:

- заборонено ховатися під опорами, деревами, у траншеях;

- не торкатися всіх металевих та заземлювальних елементів;

- пересуватися дрібними кроками, щоб мінімізувати крокову напругу.

Використання засобів індивідуального захисту: діелектричне взуття та рукавиці; каска зі струмонепровідними вставками; засоби радіозв'язку, стійкі до електромагнітних завад.

Заходи після проходження грози

Провести огляд обладнання на предмет видимих пошкоджень. Перевірити роботу обмежувачів перенапруг і грозових захисних пристроїв. Зафіксувати ймовірні точки удару блискавки. У разі аварійного відключення скласти акт та вжити заходів для усунення наслідків.

Законодавча та нормативна база України

Законодавча база України з питань охорони праці при грозових розрядах:

- Закон України «Про охорону праці».

Визначає загальні принципи забезпечення безпеки працівників. Регламентує обов'язки роботодавця щодо створення безпечних умов праці, у тому числі під час виконання робіт в умовах небезпечних природних явищ.

- Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища».

Містить вимоги щодо запобігання аварійним ситуаціям на енергетичних об'єктах, у тому числі спричинених грозовими розрядами.

- Закон України «Про електроенергетику» / «Про ринок електричної енергії».

Визначає норми безпечної експлуатації електроустановок та мереж.

Нормативно-правові акти з охорони праці:

- НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила охорони праці під час експлуатації електроустановок». Це один із головних документів для теми грозових розрядів. Він визначає: заборону виконання робіт на повітряних лініях та підстанціях під час грози; порядок дій персоналу при наближенні бурі; вимоги до заземлення, обхід грозових небезпек, засобів індивідуального захисту.

- НПАОП 40.1-1.32-01 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів». Містить вимоги до: безпечного виконання робіт у діючих електроустановках, підготовки робочих місць у разі небезпеки атмосферних впливів.

- НПАОП 0.00-1.15-07 «Правила захисту від статичної електрики». Хоча документ не прямий щодо блискавкозахисту, але регламентує захист персоналу від електричних полів, які часто супроводжують грозові явища.

Електротехнічні правила і стандарти:

- ПУЕ — «Правила улаштування електроустановок» (чинні розділи).

Розділи 1.7, 2.4, 2.5, 2.7, 4.2 описують: заземлення та захисні заходи, грозозахист ЛЕП, допустимі параметри опору контуру заземлення, вибір та застосування ОПН (обмежувачів перенапруг).

- ДСТУ EN 62305 (1–4): «Захист від блискавки».

Комплекс стандартів, гармонізованих з європейськими нормами: частина 1 — загальні принципи; частина 2 — оцінка ризику; частина 3 — фізичний захист будівель, заземлення; частина 4 — захист електронних і електротехнічних систем.

Ці стандарти регламентують вимоги до грозотросів, ОПН та схем заземлення.

- ДСТУ ІЕС 60071 «Координація ізоляції».

Містить вимоги щодо витримування обладнанням грозових імпульсів.

Галузеві нормативи енергетики

- СОУ-Н МЕВ 40.1-00100227-2010 «Настанова з блискавкозахисту електричних мереж напругою 35–750 кВ».

Документ деталізує: вибір параметрів тросового захисту, моделювання прориву блискавки, вимоги до конструкцій опор, правила експлуатації під час гроз.

- СТО, інструкції та технічні регламенти «Укренерго», «Обленерго».

Включають: інструкції дій оперативного персоналу під час грози; вимоги до доступу на ВРП/ОРУ; алгоритми відключення обладнання при загрозі перенапруг.

Документи з пожежної безпеки

- НПАОП 40.1-1.32-01 та ППБ України.

Регламентують: запобігання займанням обладнання при грозових перенапругах; пожежонебезпечні ризики при ударі блискавки в трансформатор чи шинні конструкції.

Додаткові документи

Інструкції з охорони праці для електромонтерів, диспетчерів, обхідників ПЛ. Затверджуються підприємствами та повинні базуватися на вищезазначених нормативних актах.

Паспортні вимоги виробників ОПН, розрядників, заземлювачів. Визначають: допустимі імпульсні струми; періодичність огляду; вимоги до монтажу.

Правильно організовані заходи з охорони праці при грозових розрядах значно підвищують рівень безпеки персоналу та забезпечують надійну роботу ліній електропередач і підстанцій. Комплексний підхід — поєднання технічних рішень зі строгим дотриманням інструкцій — дозволяє мінімізувати наслідки атмосферних перенапруг та запобігти аваріям.