

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет
Центр заочної, вечірньої та дистанційної форми навчання
Кафедра електроенергетики

До захисту допущено
Завідувач кафедри

_____ І. Л. Лебединський
" ____ " _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня бакалавр

зі спеціальності 141 – “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка” освітньо-професійної програми “Електротехнічні системи електроспоживання” на тему: «Аналіз систем блискавкозахисту повітряних ліній 6-35 кВ»

Студента групи ЕТз–91с Щербак Юрія Юрійовича

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Ю.Ю.Щербак
(підпис)

Керівник: заведувач кафедри, к.т.н., доцент Лебединський І.Л. _____
(підпис)

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

Щербак Юрія Юрійовича

1 Темароботи : “Аналіз систем блискавкозахисту повітряних ліній 6-35 кВ”

затверджено наказом по університету № _____ від _____

2 Термін здачі роботи

3 Вихідні дані до роботи: повітряні лінії різних класів напруги, конструкція опори лінії 35 кВ, методики розрахунку безпечної зони від ураження блискавки.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки

-Вступ.

-Огляд міжнародних та національних нормативних документів з блискавкозахисту.

-Актуальні питання блискавкозахисту ліній електропередачі.

- Аналіз грозостійкості ліній електропередач та формулювання рекомендацій з її підвищення.

- Проведення розрахунків для ПЛ 6-35кВ.Висновок.

-Список використаної літератури

5 Перелік графічного матеріалу

– Презентація на тему бакалаврської роботи

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№п/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз державних стандартів щодо блискавкозахисту	До 15.03.2023	
2	Пошук та аналіз літературних джерел	До 01.04.2023	
3	Визначення актуальності питання блискавкозахисту	До 05.05.2023	
4	Аналіз грозостійкості лінії 35 кВ	До 15.05.2023	
5	Розрахунок кількості відключень ПЛ-35 кВ	До 30.05.2023	
6	Оформлення графічного матеріалу	До 05.06.2023	
7	Оформлення пояснювальної записки	До 05.06.2023	
8	Здача роботи на перевірку	До 06.06.2023	

Студент гр. ЕТз-91с _____ Щербак Ю.Ю.
(підпис)

Керівник роботи _____ Лебединський І.Л.
(підпис)

РЕФЕРАТ

с. 73, рис. 16, табл. 9

Бібліографічний опис: Аналіз систем блискавкозахисту повітряних ліній 6-35 кВ: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра: спеціальність 141 – “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”; Освітня програма “Електротехнічні системи електроспоживання”/Ю.Ю.Щербак; керівник І. Л.Лебединський. - Суми: 2023. – 73 с.

Ключові слова:

блискавка, блискавкозахист, імпульсні перенапруги, метод захисного кута, метод фіктивної сфери, пристрої захисту від перенапруги, повітряні лінії електропередачі, технічні рішення блискавкозахисту;

lightning, lightningprotection, impulsesurges, protectiveanglemethod, fictitiousspheremethod, surgeprotectiondevices, overheadpowerlines, technicalsolutionsoflightningprotection.

Короткий огляд

В даній роботі розглянуто питання блискавкозахисту причини її виникнення та наслідки на електричні мережі. Розглянуто питання щодо визначення захисної зони від ураження блискавки на підстанції згідно існуючих державних стандартів. Розглянуто способи захисту лінії від перенапруги внаслідок ураження блискавки різних класів напруги. Окремим розділом проведено розрахунок кількості відключень лінії різних типів опор внаслідок ураження блискавки на рік.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АПВ – автоматичне повторне вмикання

ГІН – генератор імпульсної напруги

ІП – іскровий проміжок

ЛЕП – лінія електро передавання

ОПН – обмежувач перенапруги

ПЗВП – пристрій захисту від перенапруги

ПЛ – повітряна лінія

ПЛЗ – повітряна лінія із захищеними проводами

РВ – розрядник вентильний

РЛ – розрядник лінійний

РП – розподільний пункт

РТ – розрядник трубчастий

РДІ – розрядник довгоіскровий

МФС – метод фіктивної сфери

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 ОГЛЯД МІЖНАРОДНИХ ТА НАЦІОНАЛЬНИХ НОРМАТИВНИХ ДОКУМЕНТІВ З БЛИСКАВКОЗАХИСТУ	8
1.1 Європейські стандарти з блискавкозахисту	8
1.2 Визначення зон захисту за рекомендаціями МЕК (ІЕС 62305-2010)	9
1.2.1 Зона захисту за захисним кутом	9
1.2.2 Визначення зон захисту методом фіктивної сфери	10
2 АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ БЛИСКАВКОЗАХИСТУ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ	13
2.1 Блискавки як джерело атмосферної перенапруги.....	13
2.2 Загальні відомості про блискавкозахист	18
2.3 Блискавкозахист ПЛ , задачі та критерії.....	23
2.3.1 Завдання та критерії захисту ліній від блискавки	24
2.3.2 Число відключень повітряної лінії під час удару блискавки у фазні проводи.....	25
2.3.3 Блискавкозахист ПЛ різних класів напруги	31
2.4 Блискавкозахист повітряних ліній 6-35 кВ	37
3 АНАЛІЗ ГРОЗОСТІЙКОСТІ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ТА ФОРМУЛЮВАННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ З ЇЇ ПІДВИЩЕННЯ	40
3.1 Захист ліній електропередачі 6-35 кВ.....	40
3.1.1 Класифікація заходів захисту від перенапруги.....	43
3.2 Аварійність в мережах 6–35 кВ	45

					<i>БР 5.6.141.138 ПЗ</i>			
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата	<i>Аналіз систем блискавкозахисту повітряних ліній 6–35 кВ</i>	Лит.	Аркуш	Листів
Розроб.		Щербак					5	73
Перевір.		Лебединський				<i>ЕТЗ – 91с</i>		
Реценз.								
Н. Контр.		Никифоров						
Затверд.		Лебединський						

3.3	Характеристики ліній 6–35 кВ.....	46
3.3.1	Особливості блискавкозахисту з захищеними проводами	46
3.4	Пристрої захисту від перенапруги	49
3.4.1	Іскровий проміжок	50
3.4.2	Вентильні розрядники	52
3.4.3	Нелінійні обмежувачі перенапруги.....	55
4	ПРОВЕДЕННЯ РОЗРАХУНКІВ ДЛЯ ПЛ 6-35 КВ.....	58
4.1	Розрахунок числа відключень повітряної лінії 6-35 кВ при ураженні блискавкою	58
	ВИСНОВОК.....	67
	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	68

					<i>БР 5.6.141.138 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

ВСТУП

За останні роки спостерігається значне збільшення грозової активності по всій планеті в цілому, що обумовлено, зміною клімату. Це призводить до необхідності вирішення ряду питань, які пов'язані з захистом від імпульсних струмів і перенапруг.

В процесі експлуатації електричних мереж відключення повітряних ліній (ПЛ) може бути викликане різноманітними причинами, однією з яких є перекриття ізоляції внаслідок дії грозових перенапруг. Джерелом грозових перенапруг на ізоляцію повітряних ліній можуть бути як прямі розряди блискавки в ПЛ (в опору, грозозахисний трос, в фазний провід), так і наведена напруга, яка виникає внаслідок розряду блискавки в об'єкти поблизу лінії електропередавання. Перенапруга прямого розряду є більш небезпечною для ізоляції, ніж індукована перенапруга. Однак імовірність прямого розряду блискавки в ПЛ залежить від багатьох факторів і в деяких випадках може виявитися, що індуковані перенапруги можуть бути причиною перекриття ізоляції при грозових розрядах. Це є характерним для електричних мереж 10-35 кВ, де висота опори невелика і траса лінії екранується рельєфом місцевості, насадженнями та будівлями. Для забезпечення необхідного рівня грозозахисту ПЛ використовують поєднання різноманітних засобів, таких як установка одного або декількох грозозахисних тросів, зменшення опору заземлення опор, посилення ізоляції.

В даній роботі розглянуто питання блискавкозисту причини її виникнення та наслідки на електричні мережі. Розглянуто питання щодо визначення захисної зони від ураження блискавки на підстанції згідно існуючих державних стандартів. Розглянуто способи захисту лінії від перенапруги внаслідок ураження блискавки різних класів напруги. Окремим розділом проведено розрахунок кількості відключень лінії різних типів опор внаслідок ураження блискавки на рік.

					<i>БР 5.6.141.138 ПЗ</i>	Арк.
						7
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД МІЖНАРОДНИХ ТА НАЦІОНАЛЬНИХ НОРМАТИВНИХ ДОКУМЕНТІВ З БЛИСКАВКОЗАХИСТУ

1.1 Європейські стандарти з блискавкозахисту

З 01 січня 2009 року Наказом від 27.06.2008 р. № 269 Міністерства регіонального розвитку та будівництва України щодо блискавкозахисту введено національний стандарт [1]. Відповідно ДСТУ 1.7 стандарт [1] має ступінь відповідності NEC стосовно міжнародного стандарту IEC 62305:2006 (нееквівалентний або такий стандарт, що не передбачає прийняття міжнародного нормативного документу як національного). З 01 серпня 2012 року Наказом від 28.05.2012 р. № 640 Міністерства зовнішніх економічних зв'язків і торгівлі України «Про прийняття міжнародних та європейських нормативних документів як національних нормативних документів методом підтвердження» в Україні було введено сучасні Європейські норми з проектування блискавкозахисту [2–5] без скасування національного стандарту [1].

Згідно ДСТУ 1.0 національні стандарти в Україні застосовують на добровільних засадах, якщо інше не встановлено законодавством. Вимога щодо обов'язковості застосування національного стандарту [1] є, зокрема, у Правилах [6]. Вимоги щодо обов'язковості застосування національних стандартів [2–5] у національних протипожежних нормах авторами не знайдено. З цього випливає, що на сьогодні статус стандарту є обов'язковим. Коли вимоги галузевих нормативних документів є більш жорсткими, ніж у цьому документі, при розробці блискавкозахисту рекомендується використовувати галузеві вимоги [7].

					<i>БР 5.6.14.1.138 ПЗ</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Щербак</i>			<i>Аналіз систем блискавкозахисту повітряних ліній 6–35 кВ</i>	<i>Лит.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Листів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Лебединський</i>					8	73
<i>Реценз.</i>						<i>ЕТЗ – 91с</i>		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Никифоров</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Лебединський</i>						

1.2 Визначення зон захисту за рекомендаціями МЕК (ІЕС 62305-2010)

Стандарт МЕК регламентує два незалежних способи побудови зон захисту:

- за захисним кутом;
- за методом фіктивної сфери (МФС).

Проведемо технічний аналіз цих методів.

1.2.1 Зона захисту за захисним кутом

Зона захисту за захисним кутом представляється у вигляді кругового конуса, вершина якого збігається з вершиною стрижневого блискавковідводу (рис. 1.1).

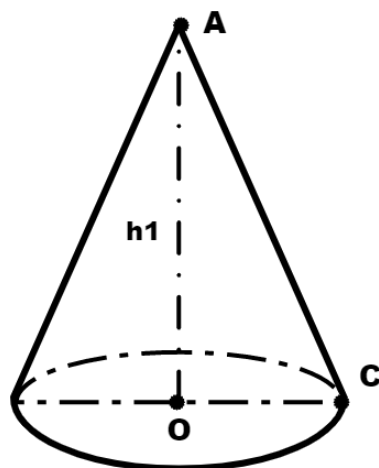


Рисунок 1.1 – Зона захисту стрижневого блискавковідводу, побудована за захисним кутом в стандарті МЕК

Кут слід визначати по табличних даних в залежності від рівня захисту і висоти блискавковідводу. Для першого рівня захисту (з надійністю $P = 0,98$) зону за захисним кутом допускається будувати тільки для блискавковідводів висотою до 20 м. Для трьох наступних рівнів з надійністю 0,95; 0,9 і 0,8 граничні висоти відповідно 30; 45; 60 м[1,2].

Аналіз конфігурації зони захисту треба починати з того, що при надій-

					БР 5.6.141.138 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

ності захисту більше 0,5 її межа принципово не може виходити з вершини блискавкоприймача. Дійсно, уявивши собі блискавкоприймач і об'єкт з двома близько розташованими однаковими стрижнями, з загальних міркувань про симетрію і тотожність розмірів прийдемо до висновку про рівний розподіл між кількістю розрядів блискавки. Блискавкоприймач прийме на себе рівно половину блискавок. Щоб направити в блискавкоприймач на 90% або 99% відсотків блискавок, необхідно збільшувати його висоту.

На рис. 1.2 побудовані значення радіуса захисту на рівні землі в залежності від висоти блискавкоприймача[3]. Виконано по кутах захисту, запропонованим стандартом МЕК.

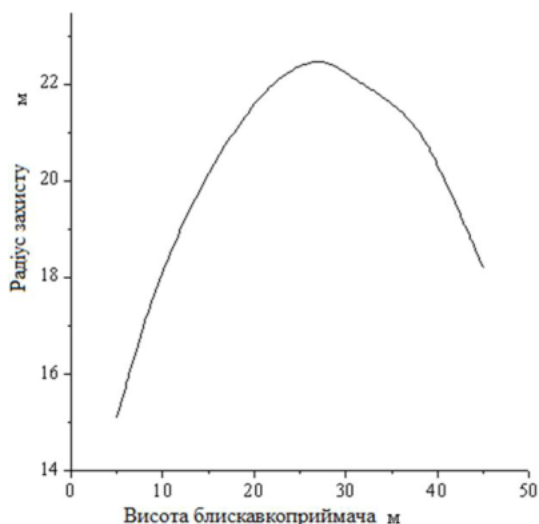


Рисунок 1.2 – Залежність радіусу захисту на рівні блискавковідводу від висоти при надійності захисту 0,9

1.2.2 Визначення зон захисту методом фіктивної сфери

Альтернативною зоною захисту, побудованим за захисним кутом, в стандарті МЕК є зони захисту, побудовані за допомогою метода фіктивної сфери. Межами такої зони є поверхня, яку окреслила б сфера заданого радіуса R , коли її прокотили навколо блискавкоприймача. Для рівнів захисту I - IV радіус сфери в стандарті МЕК [2] встановлюється рівним відповідно 20, 30, 45 і 60 м.

					<i>БР 5.6.14.1.138 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

На рис. 1.3 можна бачити як визначається радіус зони захисту і її обсяг.

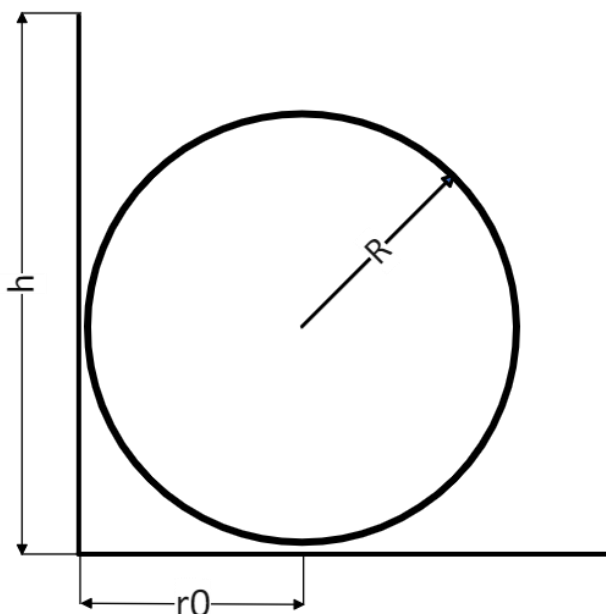


Рисунок 1.3 – Визначення зони захисту методом фіктивної сфери

Нижче надаються правила визначення зон захисту блискавковідводів для об'єктів висотою до 60 м методами зихисного кута, фіктивної сфери і у разі застосування захисної сітки. При проектуванні може бути вибраний будь-який спосіб визначення зон захисту[8].

В табл. 1.1 для рівнів захисту I—IV наводяться значення кутів при різних умовах, а також гранично допустимий крок чарунки сітки.

Таблиця 1.1 - Параметри для розрахунку зон захисту блискавкоприймачів

Рівень захисту	Радіус фіктивної сфери R , м	Кут α° , при вершині блискавковідводу для будівель різної висоти $h_{об}$, м				Крок чарунки сітки, м
		20	30	45	60	
I	20	25	*	*	*	5
II	30	35	25	*	*	10
III	45	45	35	25	*	10
IV	60	55	45	35	25	20

Стрижньові блискавкоприймачі, щогли і троси розміщуються так, щоб всі частини споруди знаходилися в зоні захисту, утвореного під кутом α до вертикалі. Захисний кут вибирається за табл. 1.1.

Метод захисного кута не використовується, якщо $h_{об}$ більше, ніж радіус фіктивної сфери. Метод фіктивної сфери використовується для визначення зони захисту блискавковідводів частини або ділянок споруди, коли згідно з табл. 1.1 виключено визначення зони захисту за захисним кутом. Об'єкт вважається захищеним, якщо фіктивна сфера, торкаючись поверхні блискавковідводу і площини, на якій той встановлений, не має спільних точок з об'єктом, що захищається.

Сітка захищає поверхню, якщо виконані наступні умови:

– провідники сітки проходять по краю даху, який виходить за габаритні розміри будівлі;

– провідник сітки проходить по гребеню даху, якщо нахил даху перевищує 1/10;

– бокові поверхні споруди на рівнях вище, ніж радіус фіктивної сфери (табл. 1.1), захищені блискавковідводами або сіткою;

– розміри чарунки сітки не більші наданих в табл. 1.1;

– сітка виконана таким методом, щоб струм блискавки мав завжди, принаймні, два різні шляхи до заземлювача; ніякі металеві частини не повинні виступати за зовнішні контури сітки.

Провідники сітки повинні бути прокладені, наскільки це можливо, найкоротшими шляхами.

					<i>БР 5.6.14.1.138 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

2 АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ БЛИСКАВКОЗАХИСТУ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

2.1 Блискавки як джерело атмосферної перенапруги

Блискавка — особливий вид проходження електричного струму через величезні повітряні прошарки, джерелом якого є атмосферний заряд, накопичений грозовою хмарою. Умови утворення таких хмар — велика вологість та швидка зміна температури повітря. За таких умов у атмосфері Землі проходять складні фізичні процеси, які призводять до утворення та накопичення електричних зарядів. При підвищенні напруженості електричного поля до критичних значень виникає розряд, який супроводжується яскравим свіченням (блискавкою) та звуком (громом). Довжина каналу блискавки може досягати кількох кілометрів, сила струму — 200 000 А, напруга — 150 000 кВ, а температура — 10000 °С і більше. Час існування блискавки 0,1 — 1 с. Щосекунди земну кулю уражають в середньому більше 100 блискавок[9].

Для блискавкозахисту цікаві тільки лінійні блискавки. Екзотичне явище — кульова блискавка — виникає дуже рідко і не може бути причиною систематичних аварій. Лінійні блискавки розвиваються між хмарою і землею, а також між окремими хмарами і усередині хмари. Більш докладно вивчені розряди між хмарою і землею, що є основною причиною ушкодження наземних споруд.

Розряд блискавки починається з розвитку лідера — слабкосвітнього каналу зі струмом у декілька сотень ампер. За напрямком руху лідера — від хмари униз або від наземної споруди нагору — блискавки розділяються на спадні і висхідні. Спадні блискавки виникають у грозових хмарах і розвиваються в напрямку до землі.

					<i>БР 5.6.14.1.138 ПЗ</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Щербак</i>			<i>Аналіз систем блискавкозахисту повітряних ліній 6–35 кВ</i>	<i>Лит.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Листів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Лебединський</i>					13	73
<i>Реценз.</i>						<i>ЕТЗ - 91с</i>		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Никифоров</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Лебединський</i>						

Висхідні блискавки збуджуються у вершин заземлених споруд і розвиваються в напрямку до хмари. Тип блискавки визначається за напрямком розгалужень на фотографіях блискавки.

Про існування висхідних блискавок, що уражають висотні об'єкти, довідалися тільки після початку систематичних досліджень блискавки на Останківській телевежі, де улаштована лабораторія з дослідження блискавки.

Полярність блискавки прийнято визначати за знаком заряду, що переноситься від хмари на землю по її каналу. Більшість блискавок (90%), незалежно від їх типу, переносять на землю негативний заряд. Спадна негативна блискавка має декілька компонент. У кожній компоненті виділяють три основні стадії:

1. Лідерна – триває мілісекунди. Відбувається пробій проміжку хмара-земля за рахунок поступового проростання провідного високотемпературного каналу лідера, що несе струм у сотні ампер і потенціал у десятки мегавольт. По довжині каналу лідера розподілений електричний заряд величиною до декількох кулон. Лідер спадної блискавки виникає під дією процесів у грозовій хмарі, і його поява не залежить від наявності на поверхні землі яких-небудь споруд. За мірою просування лідера до землі з наземних об'єктів можуть збуджуватися спрямовані до хмари зустрічні лідери. Зіткнення одного з них зі спадним лідером (чи торкання останнього поверхні землі) визначає місце удару блискавки в землю або об'єкт.

2. Головна – виникає при замиканні на землю каналу спадного лідера. При цьому збуджується перехідний процес, що розряджає лідер. Головна стадія супроводжується дуже різким збільшенням яскравості світіння каналу, могутнім звуковим ефектом (громом). Пікове значення струму може досягати значення 100кА. Дана стадія становить найбільшу небезпеку.

3. Фінальна – як правило, за першим імпульсом спостерігаються наступні - з меншими амплітудами і довжиною фронту (у середньому 0,6 мкс і 12 кА).

					<i>БР 5.6.141.138 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Загальна тривалість блискавки становить від 0,2 с до 1-1,5с. Заряд всієї блискавки коливається від одиниць до сотень кулон.

Накопичені фактичні дані про параметри спадних блискавок не дозволяють судити про їх різницю в різних географічних регіонах. Тому для всієї території України їх імовірнісні характеристики прийняті однаковими.

Висхідні негативні блискавки розвиваються з високих заземлених споруд. На рівнинній місцевості висхідні блискавки уражають об'єкти висотою більше 150 м, а в гірських районах збуджуються з гострих елементів рельєфу і споруд меншої висоти і тому спостерігаються частіше[10].

Позитивна блискавка – досить рідке явище і вивчене слабкіше. Позитивна блискавка, як правило, однокомпонентна, але заряд, що переноситься нею, може бути значно більшим, ніж заряд, що переноситься багатоконпонентною негативною блискавкою.

Дослідження блискавки зв'язані з великими труднощами. Установлено, що зрілі грозові хмари мають біполярну структуру розподілу зарядів. Верхня частина хмари несе надлишковий позитивний заряд, а нижня негативний. При такому розподілі зарядів утворюються негативні блискавки. Значно рідше спостерігаються негативно поляризовані хмари, верхня частина яких несе надлишковий негативний заряд.

За сучасними представленнями заряд хмари локалізований на окремих чисельних гідрометеорах (градини, краплі, сніжинки). Процес заряджання гідрометеорів зв'язують з їх переходами в різні агрегатні стани, зіткненням, дробленням і злиттям гідрометеорів. Поділ гідрометеорів із зарядами різних знаків відбувається в результаті їхніх різних аерогідродинамічних характеристик, за рахунок механічних сил могутніх спадних повітряних потоків у гравітаційному полі Землі. У результаті в різних частинах хмари накопичуються заряди протилежних знаків, і між цими частинами виникає електричне поле, що підсилює процес заряджання хмари.

					БР 5.6.141.138 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Основною характеристикою грозової діяльності є щільність ударів спадних блискавок на одиницю земної поверхні. Щільність ударів блискавки в землю сильно коливається по регіонах рис. 2.1[11]. Щільність ударів блискавки різко скорочується в пустелях і зростає в регіонах з інтенсивними процесами випару, де досягає значення 20-30 розрядів на 1 км² землі в рік. Особливо великий вплив рельєфу в гірській місцевості, де грозові фронти переважно поширюються по вузьких коридорах, і можливі різкі коливання щільності розрядів блискавки в землю.

Карта грозової активності України за 2015-2019 роки

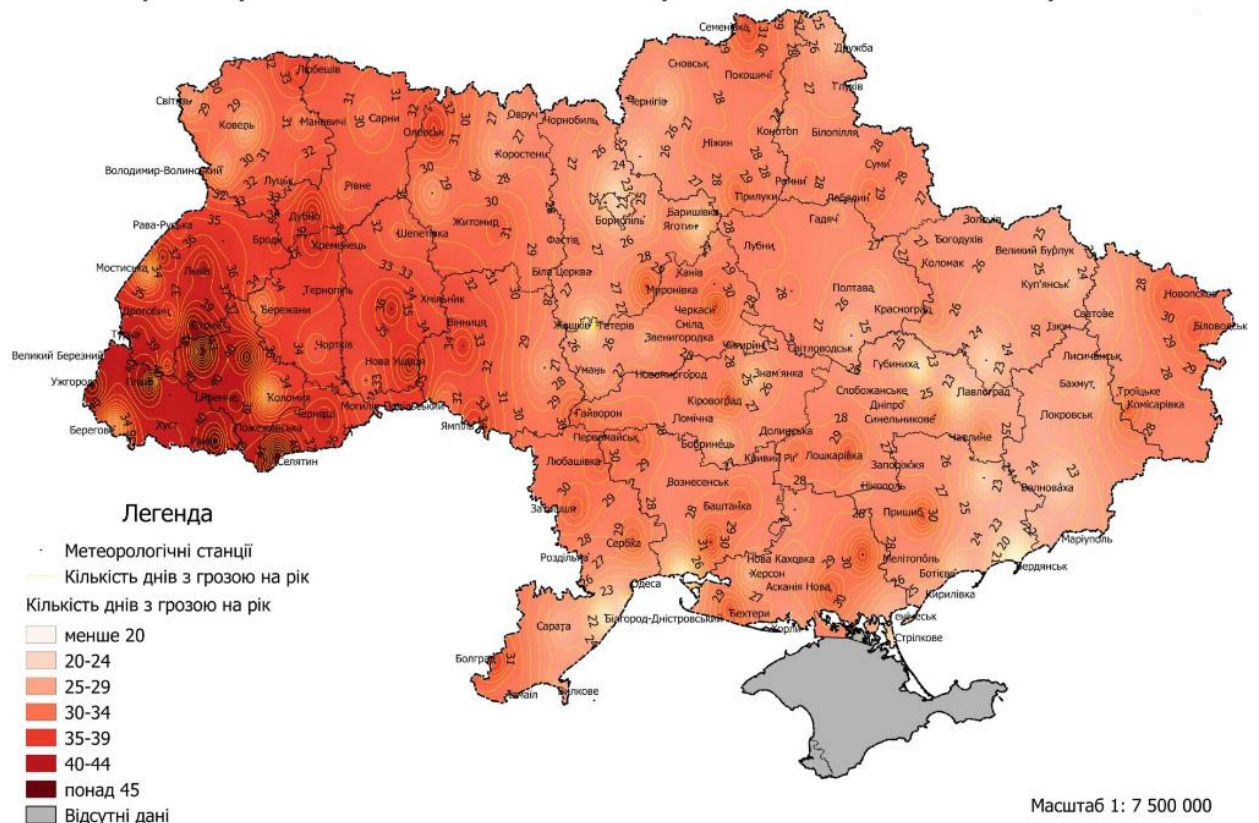


Рисунок 2.1 – Карта грозової активності України за 2015-2019 роки[11]

При підрахунку числа поразок спадними блискавками використовуються наступні припущення:

- висотний об'єкт приймає на себе розряди, що у його відсутності вразили б поверхню землі визначеної площі (так звану “поверхню стягування”);

- поверхня стягування має форму кола для зосередженого об'єкта (вертикальні труби або вежі) і форму прямокутника для протяжного об'єкта;

- число уражень об'єкта дорівнює добутку площі стягування на щільність розрядів блискавки в місці його розташування.

Для зосередженого об'єкта(2.1)[12]:

$$N = \pi \cdot R_0^2 \cdot n \quad (2.1)$$

де R_0 - радіус стягування;

n – середньорічне число ударів блискавки в 1 км^2 земної поверхні в місці знаходження будинку або споруди.

За багаторічними статистичними даними приблизно визначений зв'язок радіуса стягування R_0 і висоти h об'єкта(2.2):

$$R_0 \approx 3 \cdot h \quad (2.2)$$

Тоді одержуємо формулу для підрахунку очікуваної кількості N уражень блискавкою в рік(2.3):

$$N = 9 \cdot \pi \cdot h^2 \cdot n \cdot 10^{-6} \quad (2.3)$$

Аналогічно для протяжного об'єкта використовується напівемпірична формула(2.4):

$$N = \left[(S + 6h) \cdot (L + 6h) - 7,7h^2 \right] n \cdot 10^{-6} \quad (2.4)$$

де S і L – відповідно ширина і довжина будинку або споруди, м.

					БР 5.6.141.138 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

2.2 Загальні відомості про блискавкозахист

Блискавкозахист — це система захисних пристроїв та заходів, що призначені для забезпечення безпеки людей, збереження будівель та споруд, устаткування та матеріалів від можливих вибухів, займань та руйнувань, спричинених блискавкою.

Розрізняють первинні (прямий удар) і вторинні прояви блискавки.

Прямий удар блискавки (ураження блискавкою) — безпосередній контакт каналу блискавки з будівлею чи спорудою, що супроводжується протіканням через неї струму блискавки. Прямий удар блискавки здійснює на уражений об'єкт наступні дії: електричну, що пов'язана з ураженням людей і тварин електричним струмом та виникненням перенапруг на елементах, по яких струм відводиться в землю; теплову, що зумовлена значним виділенням теплоти на шляхах проходження струму блискавки через об'єкт; механічну, що спричинена ударною хвилею, яка поширюється від каналу блискавки, а також електродинамічними силами, що виникають у конструкціях, через які проходить струм блискавки.

Під вторинними проявами блискавки розуміють явища під час близьких розрядів блискавки, що супроводжуються появою потенціалів на конструкціях, трубопроводах, електропроводах всередині будівель і споруд, які не зазнали прямого удару блискавки. Вони виникають внаслідок електростатичної та електромагнітної індукції.

Електростатична індукція проявляється у наведені потенціалів на металевих елементах конструкції, в незамкнутих металевих контурах, що може викликати іскріння всередині будівель та споруд і тим самим ініціювати пожежу чи вибух.

Електромагнітна індукція супроводжується появою в просторі змінного магнітного поля, яке індукує в металевих контурах, що утворені із різних протяжних комунікацій електрорушійну силу (ЕРС).

					<i>БР 5.6.141.138 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

У замкнутих контурах ЕРС призводить до появи наведених струмів. У контурах, в яких контакти недостатньо надійні в місцях з'єднання, такі струми можуть викликати іскріння або сильне нагрівання, що дуже небезпечно для приміщень, де утворюються вибухо- та (або) пожежонебезпечні концентрації.

Ще однією особливістю вторинного прояву блискавки є занесення високих потенціалів у будівлю по металокопструкціях, які підведені в цю будівлю (трубопроводах, рейкових шляхах, естакадах, проводах ліній електропередач і т. п.). Такі занесення супроводжуються електричними розрядами, які можуть стати джерелом вибуху чи пожежі.

Захист об'єктів від прямих ударів блискавки забезпечується шляхом встановлення блискавковододів. Захист від електростатичної індукції (вторинний прояв блискавки) здійснюється приєднанням устаткування до заземлювача для відведення електростатичних зарядів, індукованих блискавкою, в землю. Захист від електромагнітної індукції полягає у встановленні методом зварювання перемичок між протяжними металокопструкціями в місцях їхнього зближення менше ніж на 10 см.. Інтервал між перемичками повинен становити не більше 20 м. Це дає змогу наведеному струму блискавки переходити з одного контуру в інший без утворення електричних розрядів. Захист від занесення високих потенціалів у будівлю здійснюється шляхом приєднання до заземлювача металокопструкцій перед їх введенням у будівлю.

Будівлі та споруди поділяються за рівнем блискавкозахисту на три категорії. Приналежність об'єкта, що підлягає блискавкозахисту, до тієї чи іншої категорії визначається головним чином його призначенням та класом вибухопожежонебезпечних зон згідно ПУЕ[13].

I категорія — будівлі та споруди або їх частини з вибухонебезпечними зонами класів В-I та В-II. В них зберігаються чи знаходяться постійно або використовуються під час виробничого процесу легкозаймисті та горючі речовини, що здатні утворювати газо-, пило-, пароповітряні суміші, для вибуху яких достатньо невеликого електричного розряду (іскри).

					<i>БР 5.6.14.1.138 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

II категорія — будівлі та споруди або їх частини, в яких наявні вибухонебезпечні зони В-Iа, В-Iб, В-IIа. Вибухонебезпечні газо-, пило-, пароповітряні суміші в них можуть з'явитися лише при аварії чи порушенні устано­вленого технологічного процесу. До цієї ж категорії належать зовнішні установ­ки класу В-Iг та склади, у яких зберігаються вибухонебезпечні матеріали, легко­займисті та горючі рідини.

III категорія — ціла низка будівель та споруд, зокрема: будівлі та спо­руди з пожежонебезпечними зонами класів П-I, П-II та П-IIа; зовнішні техно­логічні установки, відкриті склади горючих речовин, що належать до зон кла­сів П-III; димові та інші труби підприємств і котельних, башти та вишки різ­ного призначення висотою 15 м і більше.

Об'єкти I та II категорій необхідно захищати як від прямих ударів блис­кавки, так і від вторинних її проявів. Будівлі та споруди III категорії повинні мати захист від прямих ударів блискавки та занесення високих потенціалів, а зовнішні установки — тільки від прямих ударів.

При виборі пристроїв блискавкозахисту за категоріями враховують важ­ливість об'єкта, його висоту, місце розташування серед сусідніх об'єктів, ре­льеф місцевості, інтенсивність грозової діяльності (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Середня інтенсивність грозової діяльності у різних регіо­нах (областях) України[10]

№ зп.	Регіони (області) України	Інтенсивність грозової діяльності, год/рік
1	Автономна Республіка Крим	40-60
2	Закарпатська, Запорізька, До­нецька	80-100
3	Інші області України	60-80

Для захисту об'єкта від прямих ударів блискавки застосовують блискавковідвід — пристрій, який височіє над об'єктом захисту, сприймає удар блискавки та відводить її струм у землю. Захисна дія блискавководу базується на властивості блискавки уражати найбільш високі та добре заземлені металеві конструкції. За конструктивним виконанням блискавководи поділяються на стержневі, тросові та сітчасті, а за кількістю та загальною площею захисту — на одинарні, подвійні та багатократні. Окрім того, розрізняють блискавководи встановлені окремо та такі, що розташовані на об'єкті захисту. Будь-який блискавковідвід складається з блискавкоприймача 1 (металевий стержень, трос, сітка), який безпосередньо сприймає удар блискавки; основної опори 2 (спеціальні стовпи, елементи конструкцій будівлі), на якій розташовується блискавкоприймач; струмовідводу 3 (металевий провідник, конструкція), по якому струм блискавки передається в землю; заземлювача 4, який забезпечує розтікання струму блискавки в землі.

Блискавковідвід характеризується зоною захисту — частиною простору, навколо блискавководу, яка захищена від прямих ударів блискавки з відповідним ступенем надійності. За величиною ступеня надійності зони захисту можуть бути двох типів: зона А — ступінь надійності не менше 99,5%, зона Б — не менше 95%. Тип зони захисту блискавководу залежить від очікуваної кількості уражень блискавкою будівель та споруд без блискавкозахисту за рік, яка визначається за формулою(2.5)[12]:

$$N = [(S + 6h) \cdot (L + 6h) - 7,7h^2] n \cdot 10^{-6} \quad (2.5)$$

де S, L — відповідно ширина та довжина будівлі, м;

h — найбільша висота будівлі, м;

n — середньорічна кількість ударів блискавки в 1 км² поверхні землі в даному географічному місці (табл. 2.2).

					БР 5.6.14.1.138 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Якщо $N > 1$, то для будівель та споруд, що належать до Категорії за рівнем блискавкозахисту, приймається зона захисту А, а при $N < 1$ — зона захисту Б.

Таблиця 2.2 – Середньорічна кількість ударів блискавки в 1 км² поверхні землі залежно від інтенсивності грозової діяльності[10]

Середня інтенсивність грозової діяльності, год/рік	10— 20	20— 40	40— 60	60— 80	80— 100	100 і більше
Середньорічна кількість ударів блискавки в 1 км ² поверхні землі	1	2	4	5,5	7	8,5

Для одинарного стержневого блискавковідводу висотою $h \leq 150$ м зона захисту являє собою конус з вершиною на висоті $h_0 < h$. На рівні землі зона захисту утворює коло радіусом r_0 , а горизонтальний переріз зони на висоті h_x утворює коло радіусом r_x . Співвідношення розмірів зони захисту типу А та типу Б наведені в табл. 2.3, 2.4 [2]. Якщо відома висота h_x будівлі, що підлягає захисту, та радіус r_x на цій висоті, то для зони захисту Б повна висота блискавкоприймача становить(2.6):

$$h = \frac{(r_x + 1,63h_x)}{1,5} \quad (2.6)$$

Таблиця 2.3 – Формули для визначення розмірів зони захисту типу А та типу Б одинарного стержневого блискавковідводу

Параметр	Зона захисту А	Зона захисту Б
$h_0, м$	$0,85h$	$0,92h$
$r_0, м$	$(1,1-0,002h)h$	$1,5h$
$r_x, м$	$(1,1-0,002h)(h-h_x/0,85)$	$1,5(h-h_x/0,92)$

Таблиця 2.4 – Формули для визначення розмірів зони захисту типу А та типу Б одинарного тросового блискавководу

Параметр	Зона захисту А	Зона захисту Б
$h_0, м$	$0,85h$	$0,92h$
$r_0, м$	$(1,35-0,0025h)h$	$1,7h$
$r_x, м$	$(1,35-0,0025h)(h-h_x/0,85)$	$1,7(h-h_x/0,92)$

Якщо відома висота h_x будівлі, що підлягає захисту та радіус r_x на цій висоті, то для зони захисту Б висота тросу в точці найбільшого провисання становить(2.7):

$$h = (r_x + 1,85h_x)/1,7 \quad (2.7)$$

2.3 Блискавкозахист ПЛ , задачі та критерії

Одним з найбільш небезпечних дій блискавки на об'єкти техносфери є грозові перенапруги. Під грозовою перенапругою розуміється підвищення напруги на ізоляції або в колах об'єкта, що викликається струмом блискавки і здатне порушити нормальне функціонування об'єкта. По механізму виникнення грозові перенапруги можна розділити на перенапруги прямого удару, пов'язані з поширенням струму блискавки по елементам ураженого об'єкта, і індуковані перенапруги, які обумовлені тільки електромагнітним полем блискавки і грозових хмар. При ударі блискавки в ПЛ створюються напруги тієї ж форми, що і початковий струмовий імпульс з амплітудами від сотень кіловольт до декількох мегавольт, що поширюються по лінії зі швидкістю, близькою до швидкості світла [9].

2.3.1 Завдання та критерії захисту ліній від блискавки

Головною небезпекою для лінії є прямий удар блискавки у фазні про-води з подальшим перекриттям ізоляції від перенапруги, що виникають при цьому. Після закінчення імпульсу струму блискавки на місці перекриття залишається провідний канал з газом, який не встиг деіонізуватися, по якому під дією робочої напруги може продовжувати протікати струм промислової частоти. В процесі ліквідації замикань на лінії, викликаних грозою, витрачається ресурс роботи вимикачів; трансформатори та інше устаткування мережі. З підвищенням класу напруги лінії збільшується її довжина, висота опор, а отже, і ймовірність ураження лінії блискавкою. На лініях електропередачі вищих класів напруги, які виконуються на металевих і залізобетонних опорах, підвищують блискавкозахисні троси з малим кутом захисту. Малий імпульсний опір заземлення опор знижує ймовірність зворотного перекриття з опори на провід під час удару блискавки в опору або трос поблизу опори (рис. 2.2)[12].



Рисунок 2.2 – Задачі блискавкозахисту ліній електропередачі

					БР 5.6.14.1.138 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

У ряді випадків лінії електропередачі виконуються на дерев'яних опорах. Блискавкозахисний трос на таких лініях не підвішується, тому майже всі удари блискавки в лінію потрапляють у фазні проводи. При цьому необхідний рівень блискавкозахисту лінії забезпечується малою вірогідністю переходу імпульсного перекриття міжфазної ізоляції в силову дугу, що пов'язано з високою швидкістю відновлення електричної міцності проміжку. На лініях середніх класів напруги 6–35 кВ, які працюють в системі з ізолюваною нейтраллю, часто використовуються металеві або залізобетонні опори. Застосування блискавкозахисних тросів на таких лініях недоцільно, оскільки внаслідок малої електричної міцності ізоляції лінії практично будь-який удар блискавки в трос приводить до зворотного перекриття з троса на провід. Тому найбільш ефективними заходами, які забезпечують грозостійкість таких ліній, можна вважати застосування автоматичного повторного включення лінії і дугогасильної котушки, що зменшують струм дуги[12].

2.3.2 Число відключень повітряної лінії під час удару блискавки у фазні проводи

Ефективність блискавкозахисту визначають окремо для таких розрахункових випадків ураження лінії (рис. 2.3 і 2.4):

- 1) удар блискавки в провід з подальшим перекриттям з проводу на опору або між проводами;
- 2) удар блискавки у вершину опори з подальшим перекриттям з опори на провід;
- 3) удар блискавки в трос з подальшим перекриттям з троса на провід або на землю;
- 4) удар блискавки поблизу лінії електропередачі, що супроводжується появою перекриття внаслідок індукованої перенапруги.

					<i>БР 5.6.141.138 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

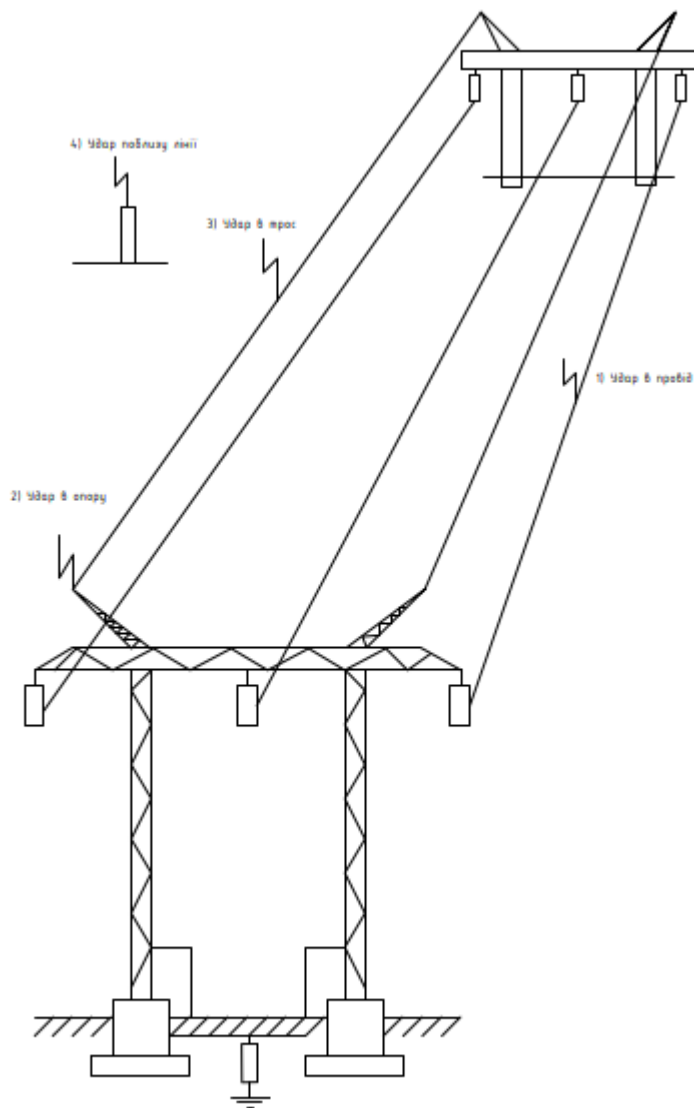


Рисунок 2.3 – Розрахункові випадки ураження лінії з тросами блискавкою

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БР 5.6.141.138 ПЗ

Арк.

26

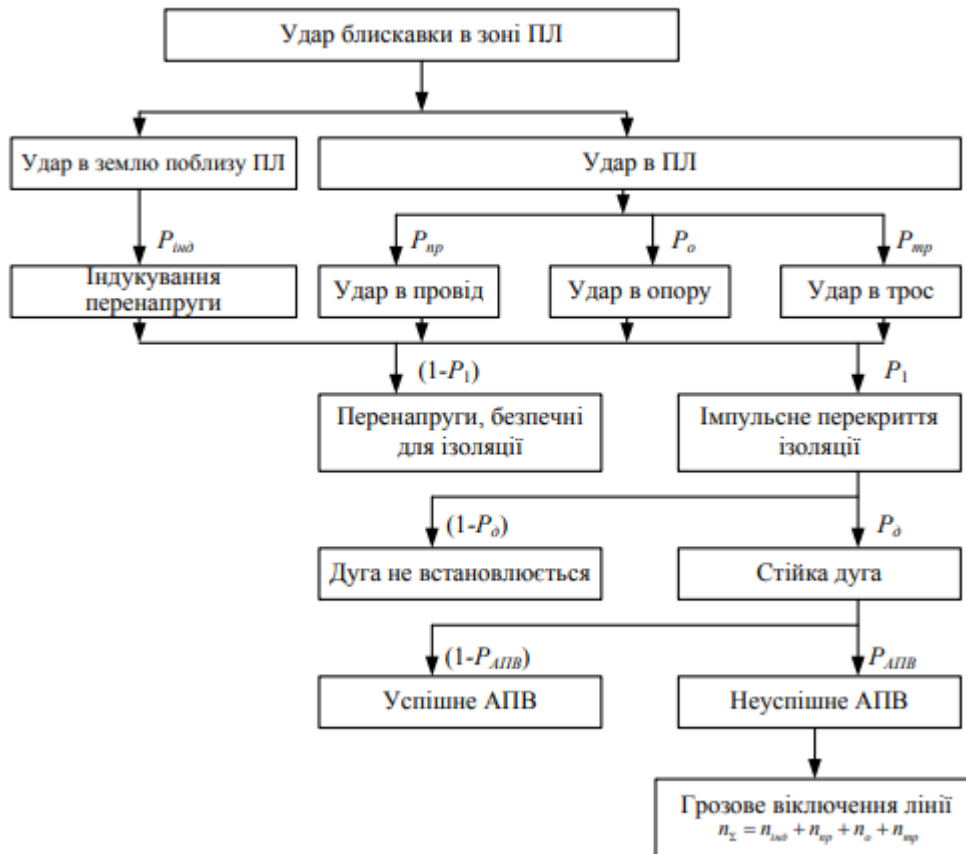


Рисунок 2.4 – Логічна схема розвитку грозових аварій ПЛ 110 кВ і вище

Можна визначити сумарне число грозових відключень в рік за формулою(2.8):

$$h_{\Sigma} = n_{пр} + n_0 + n_{тр} + n_{інд} \quad (2.8)$$

де $n_{пр}, n_0, n_{тр}$ – число відключень при ударах блискавки в провід, в опорі і трос;

$n_{інд}$ – число відключень внаслідок індуктивних перенапруги. Число відключень лінії під час удару блискавки в провід(2.9):

$$n_{пр} = N_{нуб} P_{пр} P_{1пр} P_д (1 - P_{АПВ}) \quad (2.9)$$

де $N_{нуб}$ – число прямих ударів блискавки в лінію (проводи, троси, опори);
 $P_{пр}$ – імовірність прориву блискавки на фазні проводи поза троси (при відсутності тросів $P_{пр} = 1$);
 $P_{1пр}$ – імовірність перекриття гірлянди під час удару блискавки в провід;
 P_{ϕ} – імовірність виникнення дуги під час перекриття;
 $P_{АПВ}$ – ймовірність успішної роботи АПВ. Число прямих ударів блискавки в лінію(2.10):

$$N_{нуб} = N_{нуб}^* \cdot l / 100 \cdot T_{\phi} / 100 \quad (2.10)$$

де $N_{нуб}^*$ – залишкове число ударів блискавки на 100 км довжини лінії і 100 грозових годин.

Для оцінювання числа перекриттів важливе значення має визначення імовірності прориву блискавки на провід, обійшовши троси. Для ліній надвисоких (НВН) та ультрависоких (УВН) напруги, де висока робоча напруга вже помітно розширює «зону захоплення» блискавки проводом, ця імовірність має визначальне значення. Досвід експлуатації ліній НВН показав, що зі збільшенням робочої напруги при куті тросового захисту $\alpha > 0$ помітно збільшується імовірність прориву блискавки на фазні проводи, заряд яких «притягує» блискавку до проводів.

Розглянемо методику визначення ймовірності перекриття гірлянди під час проривів блискавки $P_{1пр}$. В цьому випадку по фазних проводах від місця прориву зі швидкістю світла розповсюджуються хвилі перенапруги. Для визначення максимальної напруги на ізоляції використовуємо розрахункову схему (рис. 2.5, а), де позначено: $Z_{хв}$ – хвильовий опір фазного проводу з урахуванням корони; $Z_{БЛ}$ – еквівалентний опір каналу блискавки

					БР 5.6.141.138 ПЗ	Арк.
						28
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

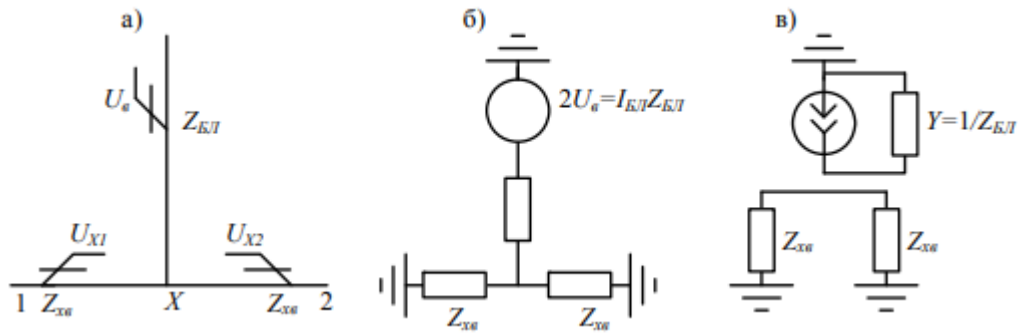


Рисунок 2.5 – Еквівалентна схема для розрахунку величини напруги на проводі в разі прориву блискавки через тросовий захист

Хвильовий опір одиночного троса або проводу визначається за формулою(2.11):

$$Z_{\epsilon} = k \cdot 60 \cdot \ln(2h_{cp} / r) \quad (2.11)$$

де $k=0,9$ – коефіцієнт, який враховує вплив імпульсної корони;

h_{cp} – середня висота троса чи проводу над землею, м;

r – радіус троса чи проводу, м(2.12);

$$r_{екв} = \sqrt[n]{n \cdot r_1 \cdot r_{np}^{n-1}} \quad (2.12)$$

де n – число складових розщепленого проводу;

r_1 – радіус однієї складової, м;

r_{np} – радіус кола, проведеного через центр складових, м.

Заміщуючи лінії, що відходять від вузла X за правилом еквівалентної хвилі, для розрахунку напруги в точці удару блискавки, отримаємо еквівалентну схему (рис. 2.5,б,в), згідно з якою(2.13) та (2.14):

$$U_X = I_{БЛ} + Z_E \quad (2.13)$$

де $I_{БЛ}$ - розрахунковий струм блискавки під час удару в добре заземлений

									Арк.
									29
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

об'єкт ;

$$Z_E = \frac{Z_{БЛ} \cdot Z_{XB} / 2}{Z_{БЛ} + Z_{XB} / 2} \quad (2.14)$$

де, Z_E - еквівалентний вхідний опір в точці удару блискавки.

Досягнувши опори ЛЕП, ця хвиля напруги діє на гірлянди ізоляторів, створюючи небезпеку їх перекриття. Впливом робочої напруги, коли ймовірність перекриття рівна одиниці, можна нехтувати. Полярність цієї напруги з рівною імовірністю або така сама, або протилежна полярності хвилі. Рівень грозостійкості лінії під час ураження блискавкою фазного проводу згідно з можна розрахувати за формулою(2.15):

$$I_{БЛпр} = U_{имн\ min} / Z_E \quad (2.15)$$

де $U_{имн\ min}$ – мінімальна імпульсна напруга перекриття фазної ізоляції для повної хвилі.

Для виявлення можливості перекриття між проводами фаз різниця напруги на лінійній ізоляції визначається за наступною формулою (2.16):

$$U_{із} = I_{БЛ} Z_E (1 - k_{12}) \quad (2.16)$$

де k_{12} – коефіцієнт зв'язку між паралельними та ураженими проводами з врахуванням імпульсної корони.

Рівень блискавкозахисту для перекриття лінійної ізоляції визначається за наступною формулою (2.17):

					<i>БР 5.6.14.1.138 ПЗ</i>	Арк.
						30
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_{\text{Блнр}} = U_{\text{із}} / [(1 - k_{12})Z_E] = U_{\text{імнмін}} / [(1 - k_{12})Z_E] \quad (2.17)$$

Аналіз досвіду експлуатації показує, що ймовірність встановлення силової дуги P_δ в першому наближенні залежить від градієнта робочої напруги уздовж шляху перекриття, її можна оцінити за формулою(2.18):

$$P_\delta = 1,6U_{\text{роб}} / l_{\text{пер}-0,06} \quad (2.18)$$

де $l_{\text{пер}}$ – сумарна довжина шляху імпульсного перекриття, см;

$U_{\text{роб}}$ – ефективне значення робочої напруги уздовж шляху перекриття, кВ.

Обчислену ймовірність встановлення дуги приймають рівною 0,1, якщо згідно з розрахунком за формулою вона менша, ніж це значення. Якщо за розрахунком P_δ більша одиниці, її приймають рівною 1,0. Таким чином, область ймовірності P_δ обмежується інтервалом $0,1 < P_\delta < 1,0$. Як показує досвід експлуатації, середні значення ймовірності P_δ для ліній різних класів напруги складають 0,5 в мережах 6–35 кВ і 0,7–0,8 в мережах 110–750 кВ. Слід мати на увазі, що наведені значення P_δ є усередненими і їх відносять до всіх видів відключень лінії (у тому числі і грозових).

2.3.3 Блискавкозахист ПЛ різних класів напруги

Високу надійність блискавкозахисту повітряних ліній електропередачі забезпечують такі заходи:

- підвішування блискавкозахисних тросів з достатньо малими кутами захисту;
- зниження імпульсного опору заземлення опор;
- підвищення імпульсної міцності ізоляції ліній і зниження ймовірності встановлення дуги (зокрема, використання дерев'яних траверс і опор);
- застосування ізольованої нейтралі або дугогасильного реактора;

					БР 5.6.14.1.138 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

– використання автоматичного повторного ввімкнення ліній.

Лінії напругою 220 кВ і вище, як правило, споруджуються на металевих або залізобетонних опорах. При цьому основним засобом блискавкозахисту є троси, що розташовуються над фазними проводами з достатньо малим кутом захисту α . Кут захисту, залежно від висоти опор, підбирається так, щоб понизити число прямих ударів блискавки у фазні проводи приблизно на 2–3 порядки. Ця умова забезпечується, зазвичай, при $\alpha = 20 \dots 30^\circ$. Проте, як показує досвід експлуатації, випадки прориву блискавки на проводи є визначальними в сумарному числі небезпечних грозових уражень ліній 330 кВ і вище, спостерігається збільшення їх числа зі зростанням номінальної напруги лінії. Це пов'язано зі збільшенням висоти опор і відповідним зниженням ефективності тросового захисту, а також зі зростанням впливу електричного поля фазних проводів на напрям розвитку лідера блискавки. В цілях збереження високої надійності тросового захисту на лініях 220 кВ і вище рекомендовано застосування тросів з від'ємними кутами захисту.

Для зменшення грозових уражень лінії надвисокої напруги частіше монтується на опорах, які мають горизонтальне розташування фаз. Додаткове зниження числа зворотних перекриттів дає використання опор, закріплених металевими відтяжками, які зменшують індуктивність шляху струму блискавки від вершини опори в землю та імпульсний опір заземлення.

На порталних опорах, що мають велику відстань між крайніми фазами, достатньо малий кут захисту забезпечується шляхом підвішування двох тросів, розташованих на однаковій висоті. Якщо троси заземлені на кожній опорі, то виникають замкнені контури, в яких під впливом магнітного поля робочого струму наводяться е.р.с. і починають протікати вихрові струми. Для зменшення пов'язаних із цим втрат електричної енергії троси безпосередньо приєднують до заземленої опори лише на кінці анкерної ділянки, а на проміжних опорах підвішують на одному – двох ізоляторах, зашунтованих іскровим проміжком. Під час грозової перенапруги ці іскрові проміжки пробиваються, і

					<i>БР 5.6.141.138 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

трос виявляється практично заземленим на кожній опорі.

Для ефективного відведення струму блискавки в землю і запобігання зворотним перекриттям ізоляції опори лінії забезпечуються відповідними заземлювачами, що знижують імпульсний опір заземлення кожної опори до значення $R_{\text{з}} < 10 \dots 20 \text{ Ом}$. Вищі значення опору заземлення опор допускаються лише для ліній, розташованих в районах з високим питомим опором ґрунту ($\rho > 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$). У таких ґрунтах бажано застосовувати ефективні глибинні заземлювачі або, в крайньому випадку, багатопроменеві заземлювачі довжиною 20–30 м. Додатковим засобом зменшення грозового ураження ліній 220 кВ і вище є використання АПВ.

Велика висота опор обумовлює на цих лініях збільшення ймовірності прориву блискавки повз троси, а також збільшення ймовірності зворотного перекриття за рахунок підвищення індуктивності опори. Лінії 110-150 кВ на металевих або залізобетонних опорах в більшості випадків також захищаються по всій довжині тросами. Кут захисту для цих ліній зазвичай вибирається в межах 20–30°, що при відносно невеликих висотах і довжинах цих ліній забезпечує задовільну надійність захисту. Проте нерідко лінії 110 кВ експлуатуються і без тросового захисту.

До таких випадків відносять:

- а) проходження лінії в районах із слабкою інтенсивністю грозової діяльності $T_{\text{г}} < 20 \text{ год}$;
- б) високий питомий опір ґрунту, що не дозволяє забезпечити малий опір заземлення і ефективну роботу троса;
- в) розташування ліній в особливо льодяних районах, де часто спостерігається рух проводів і великі механічні навантаження на трос під час обмерзання створюють небезпеку обриву троса;
- г) наявність на трасі лінії районів з агресивними навантаженнями промислових підприємств, що викликають швидку корозію тросів і небезпеку їх обриву;

					<i>БР 5.6.14.1.138 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

д) розташування лінії в гірській місцевості, де розряди з великими струмами блискавки досягають проводів лінії, орієнтуючись переважно на гірські масиви, що знаходяться поблизу.

Відсутність блискавкозахисного тросу призводить до підвищення числа коротких замикань на лінії внаслідок грозового перекриття. При цьому часто спрацьовують пристрої АПВ і збільшується число небезпечних впливів на лінії зв'язку і число дій струмів короткого замикання на електроустаткування мережі. Зростає також і ймовірність протікання великих струмів через заземлювальні пристрої підстанції. Не дивлячись на це, з техніко-економічної точки зору відсутність тросів на лініях 110–150 кВ на металевих опорах у ряді випадків виявляється виправданою, а блискавкозахист виявляється задовільним завдяки відносно невеликій висоті і довжині таких ліній.

Лінії 110–150 кВ на дерев'яних опорах не вимагають підвищення тросів, достатня грозостійкість цих ліній забезпечується високою імпульсною міцністю лінійної ізоляції і малим градієнтом напруги уздовж шляху перекриття, що обумовлює малу імовірність переходу імпульсного перекриття в силову дугу. Якщо на лінії деякі опори виконані металевими або залізобетонними (кутові або анкерні), то на них повинні встановлюватися вентиляльні розрядники або обмежувачі перенапруги. Важливим засобом підвищення надійності блискавкозахисту ліній 110–150 кВ на дерев'яних опорах є застосування АПВ.

Під час грозових уражень лінії на дерев'яних опорах спостерігається механічне розщеплення і поломки траверс, а також інших частин опори. Число таких пошкоджень сильно залежить від якості підготовки деревини під час спорудження ПЛЕП; необхідне ретельне і глибоке просочення опор для запобігання їх загниванню. Лінії 35 кВ на металевих опорах захищаються тросами лише в особливо відповідальних випадках.

Основними заходами є використання ізольованої нейтралі або дугогасильного реактора й АПВ. Лінії 35 кВ на дерев'яних опорах мають вищу надійність блискавкозахисту за рахунок використання високої імпульсної міцності

					<i>БР 5.6.141.138 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

дерева. Наведені в табл. 1.2 значення питомого числа їх відключень мають орієнтовний характер, оскільки імпульсна міцність дерева, за літературними даними, може змінюватися в два – три рази залежно від ступеня зволоження і стану деревини. Крім того, опір заземлення залізобетонних пасинків на дерев'яних опорах, які не мають струмовідвідних спусків, не нормується, що може привести до великого розкиду його значень на реальній лінії. Лінії 3–20 кВ як на металевих, так і на дерев'яних опорах також не мають тросового захисту і захищаються від грозових дій за допомогою дугогасильного реактора або ізольованої нейтралі і АПВ. На опорах з ослабленою ізоляцією або з підвищеною ймовірністю грозового ураження доцільно встановлювати вентиляльні розрядники або ОПН.

Окремі місця ліній вимагають додаткових заходів захисту. До таких місць відносять:

- перетини ліній електропередачі між собою;
- перетини ліній електропередачі з лініями зв'язку, трамвайними лініями і лініями електрифікованої залізниці;
- опори лінії електропередачі з пониженою електричною міцністю ізоляції;
- високі опори перехідних прогонів;
- відгалуження до підстанцій на відпайках і секційні роз'єднувачі на лініях;
- кабельні вставки на лініях.

Захист перетинів ліній електропередачі викликаний необхідністю запобігти важким аваріям у разі грозового перекриття з верхньої лінії на нижню лінію електропередачі або зв'язку. Такі перекриття можуть викликати помилкову роботу релейного захисту і системні аварії, пошкодження електроустаткування ліній нижчої напруги і навіть спричинити людські жертви. Найбільшу небезпеку несе удар блискавки в прогін перетину. Відстань між проводами пересічних ліній в цьому прогоні повинна бути достатньо великою, а амплітуда

					БР 5.6.14.1.138 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

перенапруги обмежена розрядниками, розташованими якомога ближче до місця перетину, тому в прогоні перетину доцільно зняти блискавкозахисний трос з нижньої лінії і вибрати точку перетину далі від середини прогону верхньої лінії. Якщо відстань від місця перетину до найближчої опори не перевищує 40 м, то розрядники можна встановлювати тільки на найближчій опорі. На лініях до 35 кВ, що мають пристрій АПВ, замість розрядників допускається встановлення захисних проміжків.

Опір заземлення опор прогону перетину не повинен перевищувати 10...20 Ом. Якщо опори дерев'яні, то на них рекомендується встановлювати паралельно гірляндам ізоляторів розрядники або іскрові проміжки, з'єднані спусками із заземлювачами опори. Необхідна відстань по вертикалі між проводами пересічних ліній залежить від номінальної напруги верхньої лінії, опору заземлення опор, довжини прогону і відстані між місцем перетину і найближчою опорою. Встановлення захисних засобів дозволяє зменшити відстань на 20–30%. Окремі металеві і залізобетонні опори ліній, виконаних, головним чином, на дерев'яних опорах без тросів, є місцями з пониженою імпульсною електричною міцністю ізоляції.

Високі перехідні прогони повітряних ліній електропередачі є джерелом підвищеного числа грозових уражень. Пов'язано з великою висотою опор і проводів над землею, що призводить до збільшення числа ударів блискавки в прогін, зниження ефективності захисту тросом, збільшення числа зворотного перекриття через велику індуктивність опор. Зниження імпульсного опору заземлення перехідних опор в цьому випадку стає недостатнім. Розрахунок очікуваного числа відключень ЛЕП з високими перехідними прогонами ускладнений необхідністю врахування складного рельєфу місцевості під прогоном і великої різниці висоти проводу над землею на окремих ділянках прогону, тому блискавкозахист відповідальних прогонів розглядається індивідуально. Як показують розрахунки, найбільш ефективним засобом захисту високих перехо-

					<i>БР 5.6.14.1.138 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

дів є встановлення вентиляльних розрядників або ОПН у верхній частині перехідних опор або на опорах, сусідніх з перехідними.

2.4 Блискавкозахист повітряних ліній 6-35 кВ

Удар блискавки в провід у багатьох випадках викликає пряме перекриття гірлянди ізоляторів, що може привести до відключення лінії. При ударі блискавки в грозозахисний трос поблизу опори практично весь струм спочатку спрямовується в землю через цю опору, і такий випадок можна розглядати як удар блискавки безпосередньо в опору.

Удар блискавки в середню частину прольоту троса призводить до розподілу струму між сусідніми опорами, що полегшує умови роботи гірлянд ізоляторів. Однак при цьому на тросі в місці удару можуть виникнути перенапруги, які створюють небезпеку перекриття повітряного проміжку саме між тросом та проводом в середині прольоту. При ударі блискавки поблизу лінії, виникають індуковані перенапруги, які істотно впливають тільки на число грозових вимкнень ліній напругою до 110 кВ. Розрахувавши число грозових вимкнень лінії при кожному з перерахованих впливів можна визначити сумарне число грозових відключень в рік визначається за формулою (2.19):

$$n_{\Sigma} = n_{np} + n_{on} + n_{tr} + n_{ind} \quad (2.19)$$

де n_{np}, n_{on}, n_{tr} – число відключень при ударах блискавки в провід, опору, трос;

n_{ind} – число відключень внаслідок індукованої перенапруги.

Підвіска грозозахисних тросів, що є основним грозозахисним заходом на лініях класів напруги 110 кВ і вище, малоефективна для ліній 6-35 кВ, що

					БР 5.6.141.138 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

викликано низькою імпульсною міцністю ізоляції 6-35 кВ. Лінії 6 - 35 кВ споруджуються без тросів, виняток складають лише особливо відповідальні лінії 35 кВ на металевих опорах. Незважаючи на відсутність тросів лінії 6-35 кВ мають ряд особливостей, створюють більш сприятливі умови для їх грозозахисту.

Такі лінії рідше піддаються прямим ударам блискавки через їх відносно невеликої висоти і протяжності. Нерідко вони виявляються частково захищеними від прямих ударів блискавки розташованими поблизу лінії об'єктами: будівлями, високими деревами, лініями більш високої напруги і т. п.[14].

Наявність ізолюваної або заземленої через дугогасний реактор нейтралі в мережах 6-35 кВ полегшує боротьбу з наслідками імпульсного перекриття ізоляції, сприяє гасінню дуги однофазного замикання на землю. Можна вважати, що випадки грозового перекриття ізоляції тільки однією з фаз лінії не викликають її відключення. Виникла дуга однофазного перекриття гасне, і небезпеку для ліній 6-35 кВ представляють лише перекриття між фазами, одночасні перекриття з декількох фаз на землю. При міжфазному перекритті залишається високою ймовірність згасання дуги, тому що градієнт робочої напруги вздовж шляху перекриття на цих лініях невеликий[15].

Лінії 6 – 35 кВ часто споруджуються на дерев'яних опорах. В цьому випадку довжина шляху грозового перекриття ізоляції збільшується за рахунок імпульсної міцності дерева траверси і тіла опори. Зменшується ймовірність перекриття і ймовірність переходу імпульсного перекриття в дугу короткого замикання. Для боротьби з розщепленням траверс і тіла опор в ряді випадків доводиться шунтувати дерев'яні частини опор металевими спусками. На відміну від ліній вищих класів напруги, лінії 6 – 35 кВ на металевих і залізобетонних опорах часто відключаються внаслідок впливу індукованої перенапруги. Розрахунки показують, що число індукованої перенапруги, здатних викликати перекриття ізоляції 35 кВ, в п'ять разів більше, ніж число перенапруги, небезпечних для мережі 110 кВ.

					<i>БР 5.6.14.1.138 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Причиною цього також є невисока імпульсна міцність ізоляції ліній 6-35 кВ на металевих залізобетонних опорах. При відсутності тросів основними грозозахисними заходами на лініях 6-35 кВ є використання дугогасного реактора в нейтралі та АПВ. З метою захисту окремих місць з ослабленою ізоляцією або з підвищеними вимогами до надійності захисту на лініях 6 - 35 кВ використовуються різні розрядники.

Після зворотного перекриття на одну з сусідніх фаз напруга на опорі дещо знижується за рахунок відводу частини струму блискавки у знову перекриту фазу. Хвильовий опір фазних проводів, за якими відбувається відведення частини струму блискавки від опори, стає рівним(2.20):

$$z_{np} (1 + k_{12} / 4) \quad (2.20)$$

При подальшому зростанні струму блискавки до величини відбувається зворотне перекриття і на третю фазу лінії. Аналогічно попередньому випадку отримуємо(2.21):

$$I_{m3} = \frac{U_{50\%+}}{z_e} \cdot (1 - k_{12-3}) \quad (2.21)$$

Випадки двофазного і трифазного перекриття характеризуються різними можливостями переходу імпульсного перекриття в коротке замикання. Для двофазного перекриття ця ймовірність P_D може бути наближено визначена за формулою(2.22):

$$P_D \approx \frac{U_{роб}}{l_{пер}} - 0,06 \quad (2.22)$$

де $l_{пер}$ - сумарна довжина шляху імпульсного перекриття, см;

$U_{роб}$ – ефективне значення робочої напруги вздовж шляху перекриття, кВ.

					БР 5.6.14.1.138 ПЗ	Арк.
						39
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 АНАЛІЗ ГРОЗОСТІЙКОСТІ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ТА ФОРМУЛЮВАННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ З ЇЇ ПІДВИЩЕННЯ

3.1 Захист ліній електропередачі 6-35 кВ

Перенапруга прямого розряду є більш небезпечною для ізоляції, ніж індукована перенапруга. Однак імовірність прямого розряду блискавки в ПЛ залежить від багатьох факторів і в деяких випадках може виявитися, що індуквані перенапруги можуть бути причиною перекриття ізоляції при грозових розрядах. Це є характерним для електричних мереж 10-35 кВ, де висота опори невелика і траса лінії екранується рельєфом місцевості, насадженнями та будівлями. Для забезпечення необхідного рівня грозозахисту ПЛ використовують поєднання різноманітних засобів таких як установка одного або декількох грозозахисних тросів, зменшення опору заземлення опор, посилення ізоляції. В деяких випадках дані засоби не можуть забезпечити необхідний рівень грозозахисту. В такому разі ефективним способом підвищення грозостійкості лінії електропередавання може стати установка на опорах ПЛ нелінійних обмежувачів перенапруги (ОПН)[16].

Лінії 35 кВ на дерев'яних опорах мають більш високу надійність блискавкозахисту за рахунок використання високої імпульсної міцності дерева. Оцінки їх питомої числа відключень мають орієнтовний характер, оскільки імпульсна міцність дерева, за літературними даними, може змінюватися в два-три рази в залежності від ступеня зволоження і стану деревини. Крім того, опір заземлення залізобетонних пасинків на дерев'яних опорах, що не мають струмовідводячих спусків, не нормується, що може привести до великого розкиду його значень на реальній лінії.

					<i>БР 5.6.14.1.138 ПЗ</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Щербак</i>			<i>Аналіз систем блискавкозахисту повітряних ліній 6-35 кВ</i>	<i>Лит.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Листів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Лебединський</i>					40	73
<i>Реценз.</i>						<i>ЕТЗ - 91с</i>		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Никифоров</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Лебединський</i>						

Лінії 6 – 20 кВ як на металевих, так і на дерев'яних опорах також не мають тросової захисту і захищаються від грозових впливів за допомогою дугогасного реактора або ізольованою нейтралі і АПВ. На опорах з ослабленою ізоляцією або з підвищеною вірогідністю грозового ураження встановлюються іскрові проміжки або вентиляльні розрядники [17].

Вище при розрахунку очікуваного річного числа грозових відключень ПЛ 6 - 35 кВ передбачалося, що вздовж лінії ізоляція однорідна і немає окремих місць з ослабленою ізоляцією. Однак, на реальних лініях завжди є такі місця, які при відсутності відповідних заходів захисту можуть привести до значного збільшення очікуваного річного числа грозових вимкнень.

В останні роки все частіше на ПЛ 6 – 35 кВ для захисту ослаблених місць встановлюються нелінійні обмежувачі перенапруги.

Окремі місця ліній вимагають додаткових заходів захисту. До таких місць відносяться [18]:

- перетину ліній електропередавання між собою;
- перетину ліній електропередавання з лініями зв'язку, трамвайними коліями та лініями електрифікованої залізниці;
- опори ліній електропередачі зі зниженою електричною міцністю ізоляції;
- високі опори перехідних прольотів;
- відгалуження до підстанцій на відпайки і секціонуючі роз'єднувачі на лініях.

Захист перетинів ліній електропередавання викликана необхідністю запобігти важкі аварії в разі грозового перекриття з верхньої лінії на нижню лінію електропередавання або лінію зв'язку. Такі перекриття можуть викликати помилкову роботу релейного захисту та системні аварії, пошкодження електрообладнання ліній більш низької напруги і навіть спричинити людські жертви. Найбільшу небезпеку становить удар блискавки в проліт перетинання. Ві-

					<i>БР 5.6.14.1.138 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

вдстань між проводами пересічних ліній в цьому прольоті має бути досить великою, а амплітуда перенапруги обмежена розрядниками або ОПН, розташованими якомога ближче до місця перетину. Тому в прольоті перетину доцільно зняти блискавкозахисний трос з нижньої лінії і вибрати точку перетину далі від середини прольоту верхньої лінії. Якщо відстань від місця перетину до найближчої опори не перевищує 40 м, то розрядники або ОПН можна встановлювати тільки на найближчій опорі[19].

На лініях до 35 кВ, що мають пристрій АПВ, замість розрядників допускається установка захисних проміжків. Опір заземлення опор прольоту перетину не повинно бути вище 10 ... 20 Ом. Якщо опори дерев'яні, то на них рекомендується встановлювати паралельно гірляндам трубчасті розрядники або ОПН, або іскрові проміжки, з'єднані спусками з заземлювачами опори. Необхідна відстань S по вертикалі між проводами пересічних ліній залежить від номінальної напруги верхньої лінії, опору заземлення опор, довжини прольоту і відстані між місцем перетину і найближчій опорою (табл.3.1). Як видно з таблиці, установка захисних засобів дозволяє зменшити відстань S на 20 - 30%.

Таблиця 3.1 – Мінімальні допустимі відстані між проводами повітряних ліній[13]

Напруга верхньої лінії, кВ	Довжина прольоту пересічної лінії, м	Найменші допустимі відстані S між проводами, м			
		при найменшій відстані від місця перетину до найближчої опори верхньої лінії з розрядником, м			при відсутності спеціальних заходів блискавкозахисту перетину
		30 – 70	70 – 100	100 – 150	
35	До 200	3	3-4	-	5
	200-300	3-4	4-5	4-5	
6-20	До 100	2	-	-	4
	100-150	2-2,5	-	-	

Окремі металеві та залізобетонні опори ліній, виконаних головним чином на дерев'яних опорах без тросів, являють собою місце зі зниженою 35 імпульсної електричної міцністю ізоляції. Ці місця доцільно захистити трифазними комплектами вентиляльних розрядників або нелінійних обмежувачів перенапруги.

Високі перехідні прольоти ПЛ є джерелами підвищеного числа грозових вимкнень. Це пов'язано з великою висотою опор і проводів над землею (водою), що призводить до збільшення числа ударів блискавки в проліт, зниження ефективності захисту тросом, збільшення числа зворотних перекриттів через великий індуктивності опор. Зниження імпульсного опору заземлення опор в цьому випадку стає недостатнім [20].

Розрахунок очікуваного числа відключень ПЛ з високими перехідними прольотами утруднений необхідністю врахування складного рельєфу місцевості під прольотом і великої різниці висоти проводу над землею на окремих ділянках прольоту. Тому блискавкозахист відповідальних прольотів розглядається індивідуально. Як показують розрахунки, найбільш ефективним засобом захисту високих переходів є установка РВ або ОПН у верхній частині перехідних опор або на опорах, сусідніх з перехідними.

3.1.1 Класифікація заходів захисту від перенапруги

Заходи та засоби захисту від перенапруги поділяються на організаційні та технічні. Організаційні заходи захисту, в свою чергу, включають системні і оптимізаційні, технічні заходи та засоби захисту - превентивні і комутаційні [10].

Системні заходи не є спеціальними заходами захисту від перенапруги. Однак спорудження паралельних ліній і розширення резервів обладнання, установка синхронних компенсаторів і шунтуючих реакторів та інші заходи дають можливість запобігти або істотно зменшити ймовірність розвитку системної аварії, що призводить до найбільших збитків. Ці заходи обмежують також підвищення робочої напруги понад допустиму [21].

					БР 5.6.141.138 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Оптимізаційні заходи також не є спеціальними заходами захисту від перенапруг у вузькому сенсі слова. Як впливає з назви, вони припускають розробку і вибір на стадії проектування, а також реалізацію в умовах експлуатації оптимальної стратегії ведення режиму роботи мережі, комутації і ліквідація негативних наслідків впливу перенапруги. До їх числа слід віднести АПВ, селективний релейний захист мережі, автоматичне регулювання збудження генераторів і синхронних компенсаторів, своєчасну і ретельну профілактику ізоляції і ремонт обладнання.

Превентивні заходи захисту чинять постійний вплив на мережу. Їх призначення - запобігти виникненню перенапруги або сприяти обмеженню їх величини. Сприятлива дія превентивних заходів захисту проявляється протягом усього перехідного процесу. До таких заходів можна віднести, зокрема, застосування вимикачів, робота яких не викликає появи великої перенапруги (наприклад, вимикачів без небезпечних повторних запалень дуги між контактами і з шунтуючими опорами), грозозахисних тросів, заземлення опор на лініях, ємнісний захист ізоляції обмоток трансформаторів, заземлення нейтралі трансформаторів через дугогасні реактори [10].

Комутаційні засоби захисту від перенапруги, як правило, містять в собі комутуючі елементи, наприклад, іскрові проміжки. Вони спрацьовують, коли перенапруга в точці їх установки перевищить деяку критичну величину. Це призводить до зміни схеми або параметрів мережі. Перенапруга на ізоляції обмежується до допустимих меж, а ймовірність виникнення перенапруги високої кратності істотно зменшується. До комутаційних засобів захисту можна віднести також і обмежувачі перенапруги нелінійні (ОПН). У цих апаратах відсутні іскрові проміжки і високонелінійні резистори підключені до мережі постійно. Однак при підвищенні напруги на ОПН понад найбільшу робочу напругу, різко зменшується їх опір, що еквівалентно спрацьовуванню іскрових проміжків [10].

Для захисту обладнання від прямих ударів блискавки застосовуються

					<i>БР 5.6.141.138 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

громовідводи на підстанціях і грозозахисні троси на лініях. Зменшення ймовірності небезпечної грозової перенапруги при ударах блискавки в громовідводи і інші заземленні елементи ліній та підстанцій досягається з'єднанням їх із землею при забезпеченні досить малого імпульсного опору заземлення. Захист ізоляції від хвиль, що набігають по лініях, здійснюється за допомогою розрядників і нелінійних обмежувачів перенапруги[9].

3.2 Аварійність в мережах 6–35 кВ

При впливі грозового перенапруження на ПЛ з неізольованими проводами відбувається перекриття ізолятора (рис. 3.1, а). З великою ймовірністю, під дією робочої напруги, грозове перекриття переходить в дугу промислової частоти. Внаслідок електродинамічних сил дуга переміщується по проводу. Дуга горить до тих пір поки лінія не буде відключена, або відбудеться згасання дуги. Завдяки тому, що дуга переміщається по неізольованому проводу перегорання проводів силовою дугою відбуваються відносно рідко[9].



Рисунок 3.1 – Встановлення силової дуги промислової частоти внаслідок грозового перекриття ізолятора: а) на лінії з неізольованими проводами; б) на лінії з захищеними проводами

На ПЛ з захищеними проводами при грозовому перенапруженні відбувається перекриття ізолятора лінії, а потім - пробій твердої ізоляції проводу (рис. 3.1, б). Часто грозове перекриття переходить в дугу промислової частоти, яка горить в місці пробою ізоляції до тих пір поки лінія не буде відключена. У

										Арк.
										45
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

разі великих струмів КЗ або тривалого горіння дуги це призводить до перегорання проводу або до серйозної аварії на лінії[22–24].

3.3 Характеристики ліній 6–35 кВ

3.3.1 Особливості блискавкозахисту з захищеними проводами

Захищений провід, складається з алюмінієвого крученого проводу і захисної оболонки (рис. 3.2). У деяких конструкціях захищених проводів застосовується сталєалюмінієвий дріт, провід, що складається з сердечника у вигляді сталєвого троса з навитими на нього алюмінієвими дротами. Алюмінієві дроти можуть мати форму неправильних багатокутників з округленими краями для збільшення щільності заповнення перетину дроту активним провідниковим матеріалом (алюмінієм). В якості захисної оболонки використовується, в основному, світлостабілізований поліетилен[9].

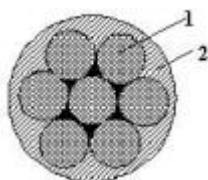


Рисунок 3.2 - Перетин захищеного проводу; 1 - алюмінієвий кручений дріт; 2 - захисна оболонка

Захисна оболонка забезпечує короткочасну ізоляцію проводу в разі дотику до нього гілок дерева, при перехрещуванні проводів під впливом вітру або при випадкових дотиках до них сторонніх предметів. Повітряні лінії з захищеними проводами мають велику надійність роботи, ніж лінії з неізольованими проводами [25].

					БР 5.6.14.1.138 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

У промислово розвинених країнах ПЛ з захищеними проводами стають все поширенішими. В Японії, наприклад, всі ПЛ 6,6 кВ виконані з захищеними проводами. В останні роки в Україні також ведеться будівництво ПЛ 6 - 35 кВ з захищеними проводами при реконструкції або новому будівництві, що передбачено технічною політикою України.

У США запропоновано для грозозахисту ПЛ з захищеними проводами видаляти тверду ізоляцію на ділянці лінії поблизу опори, а на кордоні ізоляції встановлювати масивні затискачі (рис. 3.3)[22].

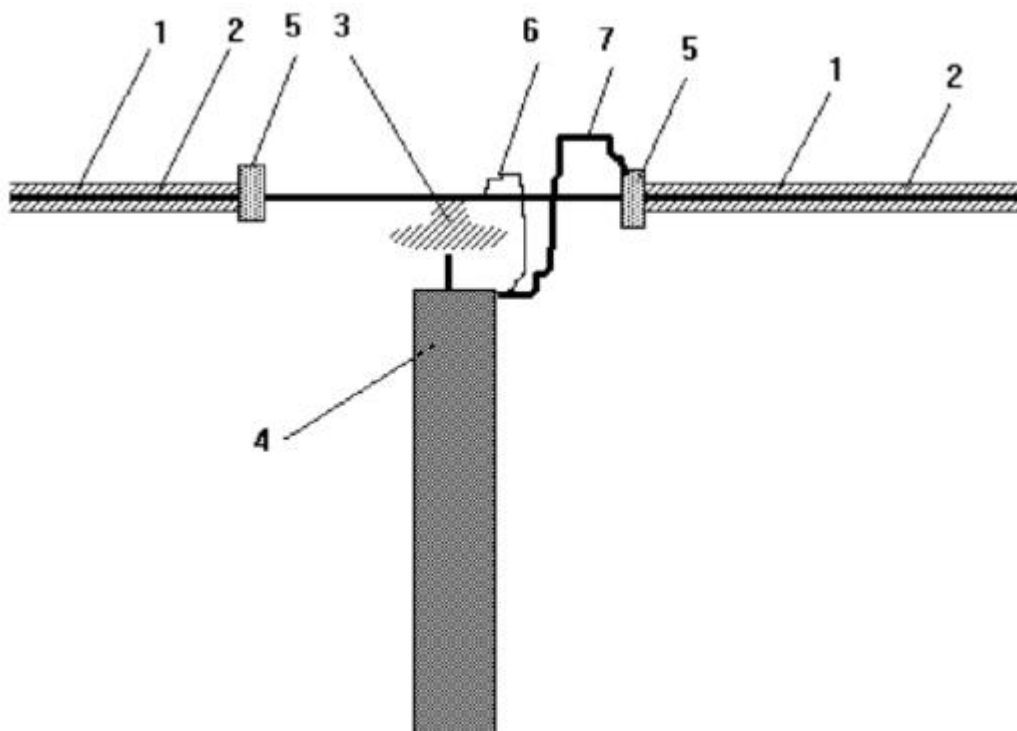


Рисунок 3.3 - Захист лінії від дугових ушкоджень за допомогою масивних затискачів: 1 - провід, 2 - ізоляція, 3 - ізолятор, 4 - опора, 5 - масивний затискач, 6 - грозове перекриття, 7 – дуга

При перенапруженні відбувається грозове перекриття 6 ізолятора 3 на неізольовану ділянку проводу 1. Це перекриття переходить в силову дугу 7, яка під дією електродинамічних сил переміщається по проводу до тих пір, поки не дійде до кордону ізоляції, на якій встановлений масивний затискач 5.

										Арк.
										47
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР 5.6.141.138 ПЗ					

Далі дуга не рухається і продовжує горіти, спираючись одним зі своїх кінців на затиск 5, до тих пір поки лінія не буде відключена. У разі системи з заземленою нейтраллю (як, наприклад, в США) струми КЗ дуже великі, і автоматика відносно швидко реагує на КЗ і відключає пошкоджену лінію. Однак, відбувається значне обгорання затискачів 5, що визначає необхідність їх періодичної заміни. Крім того, освіта силової дуги призводить до необхідності відключення лінії.

В Японії широке поширення для грозозахисту повітряних ліній отримали нелінійні обмежувачі перенапруги (ОПН) (рис. 3.4). Більше 6 млн. штук вже встановлено лише в одній з енергосистем Японії [20,26,27].

ОПН підключається через іскровий проміжок і розрахований на струм грозового перенапруження 2,5 кА. ОПН ефективно обмежують індуктовані перенапруги. Але в разі перевищення струму грозового перенапруження понад розрахункового рівня вони пошкоджуються.

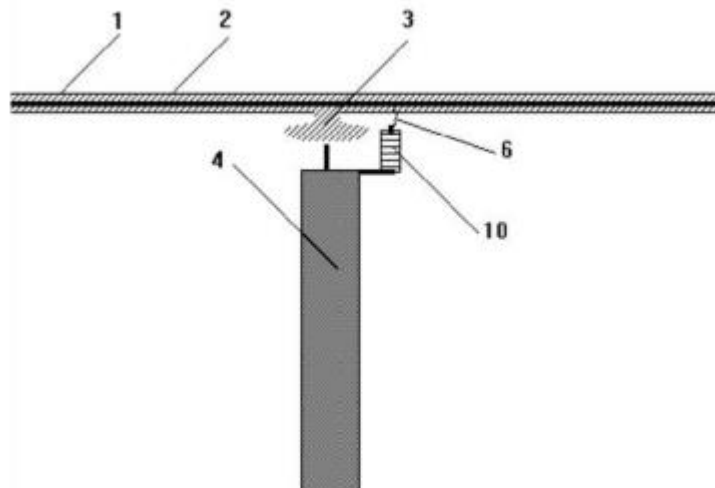


Рисунок 3.4 - Захист лінії від грозових перенапруг за допомогою ОПН (Японська система, [123]): 1 - провід, 2 - ізоляція, 3 - ізолятор, 4 - опора, 6 - грозове покриття, 10 – ОПН

Для найбільш ефективного вирішення проблеми грозозахисту дуже ба-

					БР 5.6.141.138 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

жано встановлювати ОПН паралельно кожному ізолятору. При масовій установці головним недоліком ОПН стає їх висока вартість. Все вищевказане визначає необхідність пошуку нових технічних рішень, що підвищують надійність і економічну ефективність грозозахисних заходів.

У НВО "Стример" розроблений і запатентований в Росії, а також за кордоном новий спосіб грозозахисту, заснований на використанні Довго - іскрового розрядника (РДІ), простих по конструкції і внаслідок цього - надійних і дешевих пристроїв [127 - 134]. РДІ засновані на принципі подовження каналу грозового перекриття і відсутності можливості встановлення силової дуги. Головною відмінністю довго-іскрових розрядників є їх несхильність до руйнувань і пошкоджень грозовими і дуговими струмами, оскільки вони протікають поза апаратів, по повітряю уздовж їх поверхні[28–30].

Ця унікальна для грозозахисних апаратів якість, поряд з конструктивною простотою зумовило можливість їх успішного застосування в якості ефективного і надійного засобу захисту повітряних ліній і електричних мереж від грозових перенапруг і їх наслідків.

3.4 Пристрої захисту від перенапруги

Для забезпечення захисту електричних мереж рекомендовано розміщувати ОПН на кожній опорі паралельно ізоляторам. Проте така установка призводить до зростання в декілька разів вартості спорудження нових ліній електропередавання та реконструкції існуючих. Саме тому велика кількість вітчизняних та іноземних науково-технічних публікацій присвяченні визначенню ефективності використання нелінійних обмежувачів перенапруги для захисту повітряних ліній. Однак більшість з них розглядають ділянки повітряних ліній електропередавання незначної протяжності (не більше 2 км), що, в свою чергу, не дозволяє в повній мірі дослідити захисні властивості ОПН. В [31] проведено дослідження місць розміщення ОПН на повітряній лінії електропередавання

					БР 5.6.14.1.138 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

напругою 10 кВ загальною протяжністю 1,8 км, що складається з 10 прогонів та 9 опор. В даній роботі було виконано моделювання різноманітних варіантів розміщення ОПН при розряді блискавки в землю та в об'єкт, розміщений на висоті 50, 100 і 200 м від землі. В результаті було виявлено, що зона захисту ОПН складає близько 600 м. По отриманим результатам було сформовано наступні рекомендації по вибору місць встановлення ОПН: – для ПЛ 6-10 кВ не більше, ніж через 6-12 опор; – для ПЛ 35 кВ не більше, ніж через 4-5 опор[16].

3.4.1 Іскровий проміжок

Найбільш простим і дешевим пристроєм захисту від перенапруги є іскрові проміжки (ІП). У мережах до 35 кВ ІП мають невелику довжину і можуть закорачуватися птахами, що сідають на електроди. З метою запобігання замикань в заземлюючих спусках ІП створюються додаткові розриви. У табл. 3.2 наведені основні характеристики ІП 6 - 35 кВ.

Таблиця 3.2 – Характеристики ІП

	Номінальна напруга, кВ				
	6	10	10	20	35
Довжина захисного проміжку	20	40	60	140	250
Розрядна напруга при 50 Гц, кВ діюча	20	34	45	70	105
50% імпульсна напруга при позитивній полярності, кВ	34	51	66	121	195
Теж, при негативній полярності, кВ	34	53	68	134	220

ІП мають ряд недоліків, які обмежують їх широке застосування. Їх пробивна напруга має великий статистичний розкид, що сильно ускладнює координацію пробивної напруги ІП з характеристиками, що захищається ізоляції. Внаслідок різкої неоднорідності електричного поля між контактами має місце суттєве підвищення розрядної напруги ІП при крутих фронтах хвиль впливає

перенапряга. В області малого передрозрядного часу ($t_{кр} \leq 2 \text{ мкс}$) вольт-секундна характеристика ізоляції (з урахуванням статистичного розкиду) може проходити нижче вольт-секундної характеристики ІП (рис. 3.5), тобто за часів $t \leq t_{кр}$ ізоляція залишається незахищеною і може бути пошкоджена [10].

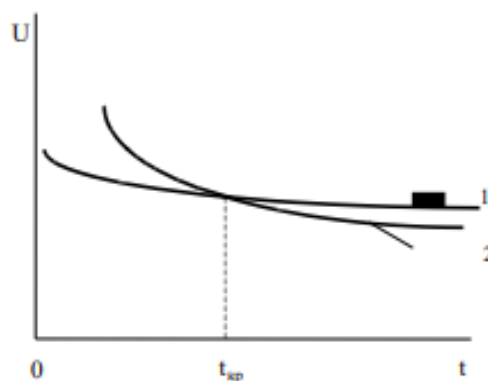


Рисунок 3.5 – Вольт-секундна характеристика ізоляції (нижня, що огинає – 1) та ІП (верхня, що огинає – 2)

Будь-які спрацювання ІП викликають утворення дуги струму КЗ, який в мережах 110 кВ і вище, а в ряді випадків і в мережах 35 кВ і нижче, мимовільно згаснути не може. Кожне таке КЗ викликає небажані електродинамічні впливи в області трансформаторів і електричних машин, прискорений знос і позачергові ревізії вимикачів, що допускають обмежену кількість відключень струмів КЗ.

Спрацювання ІП, встановлених паралельно ізоляції, що захищається, викликає різкий зріз напруги на ній. Це призводить до виникнення небезпечних градієнтних перенапряг на поздовжній ізоляції (між витками і котушками) обмоток трансформаторів, реакторів і електричних машин.

Деяке поліпшення характеристик може бути отримано шляхом примусового гасіння дуги. Для цього, в трубчастих розрядниках, ІП поміщають в трубку з газогенеруючого матеріалу, наприклад, фібри або вініласту. При протіканні через ІП імпульсного струму блискавки і струму к.з. горить потужна дуга, яка викликає високу температуру, газовиділення і високий тиск (до

						Арк.
					БР 5.6.14.1.138 ПЗ	
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

декількох десятків атмосфер). Гази, виходячи через відкритий кінець трубки, створюють поздовжнє дуття, і при першому ж проходженні струму через нуль дуга гасне [10].

3.4.2 Вентильні розрядники

До останнього часу основним засобом захисту від перенапруг був вентильний розрядник. Цей захисний апарат складається з іскрових проміжків і послідовних нелінійних опорів, іноді званих робочими опорами. У більшості вентильних розрядників паралельно іскровим проміжків приєднуються шунтуючі опори (ШР). Останні служать для рівномірного розподілу напруги по іскровим проміжків.

При впливі на вентильний розрядник перенапруги, що перевищують його пробивну напругу, відбувається пробій ІІ та робочий опір приєднуються до мережі. При цьому перенапруження в точці установки апарату визначається в основному падінням напруги на робочих опорах. Воно іноді називається залишковою напругою на розряднику ($U_{зал}$). Ця напруга має бути \sim на 30% менше, ніж допустима напруга на ізоляції, що захищається. Струм, що протікає через розрядник за імпульсним пробоем ІІ під впливом напруги 50 Гц, називається супроводжуючим струмом. Цей струм обмежується робочим опором апарату, величина якого різко зростає при зниженні напруги на розряднику. При переході струму через нуль дуга в ІІ гасне, і розрядник приходить в початковий стан. Таким чином, ІІ вентильних розрядників при відсутності перенапруги відокремлюють робочі опори від мережі і підключають їх в момент появи небезпечних для ізоляції перенапруги.

Іскрові проміжки, по можливості, повинні мати горизонтальну вольт-секундну характеристику, тобто мала зміна пробивної напруги $U_{пр}$ в широкому діапазоні передрозрядного часу (від мкс до мс) і малий розкид $U_{пр}$. Крім того,

					<i>БР 5.6.141.138 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

U_{np} не повинно змінюватися після багаторазового пропускання нормованих імпульсних і супроводжуючих струмів, а також при коливаннях температури і впливу тряски, ударів і вібрації. ІІ повинні гасити дугу супроводжуючого струму, як правило, при першому переході його через нуль [10].

Для виконання цих вимог застосовуються ІІ наступних типів:

- з нерухомою дугою супроводжуючого струму, яка гаситься практично в тому ж місці, де відбувається пробій (використовується в розрядниках серій РВС, РВП і РВО);

- з дугою, що обертається в кільцевому зазорі між електродами під дією магнітного поля (такі ІІ застосовуються в вентильних розрядниках серій РВМ і РВМГ);

- з розтягнутою дугою, яка пересуваючись між електродами під дією магнітного поля, значно (в десятки і сотні разів) збільшує свою довжину; з такими ІІ випускаються розрядники серій РВТ та РВРД.

Послідовний опір вентильного розрядника повинен мати нелінійну вольт-амперну характеристику і здатність багаторазово пропускати імпульсні і супровідні струми. Для нелінійних опорів використовуються тверді напівпровідникові матеріали, провідність яких практично миттєво зростає при збільшенні прикладеної напруги. В даний час НС виготовляються з електротехнічного карбіду кремнію (карборунд) SiC.

Питомий опір запірного шару нелінійно залежить від напруженості електричного поля. При малих значеннях воно становить $10^4 \dots 10^6$ Ом·м і до нього додається практично всю напругу. При підвищенні напруженості поля провідність запірного шару різко зростає і загальний опір резистора починає визначатися власне зернами карборунда [10].

Вольт-амперну характеристику нелінійних резисторів прийнято характеризувати степеневою залежністю [10](3.1):

$$U = CI^a \tag{3.1}$$

					БР 5.6.14.1.138 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

де, C - постійна, що враховує властивості матеріалу і розмір резистора;
 α - коефіцієнт нелінійності матеріалу, який має різні значення в області малих і великих струмів.

Як випливає з наведеної залежності, вольт-амперну характеристику доцільно будувати в логарифмічних шкалах, в яких вона зображується відрізками прямої лінії. На рис. 3.6 показана типова вольт-амперна характеристика влітових дисків, які застосовуються в розрядниках типу РВС. Характеристика знята при імпульсах 20/40 мкс. Області великих струмів, що проходять через розрядник при грозових перенапруженнях, відповідає ділянці Б вольт-амперної характеристики.

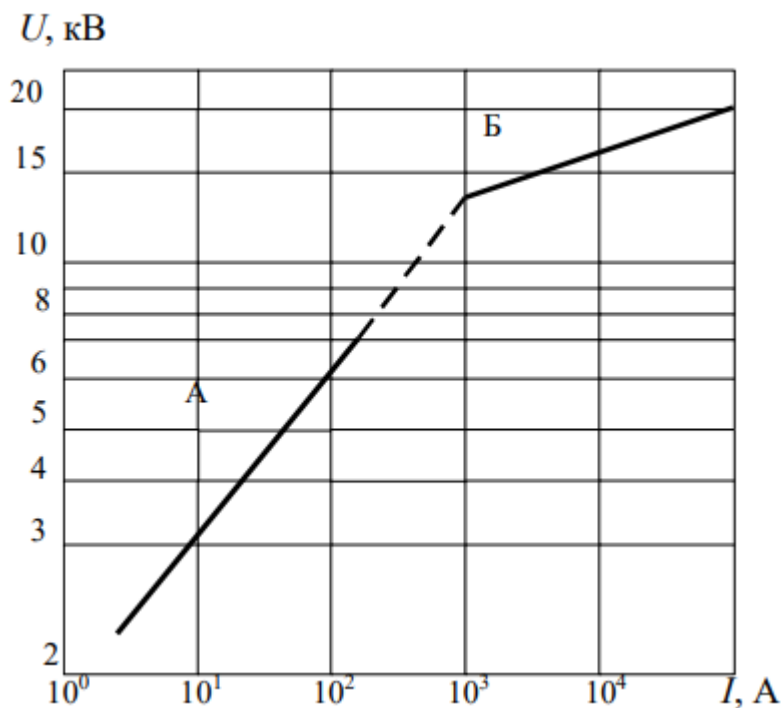


Рисунок 3.6 – ВАХ робочих опорів вентильного розрядника

Вольт-амперна характеристика нелінійного опору, що складається з m послідовно включених резисторів, записується у вигляді(3.2):

$$U = mCI^{\alpha} \quad (3.2)$$

Значення C і α повинні бути різними для двох ділянок вольт амперної характеристики.

3.4.3 Нелінійні обмежувачі перенапруги

Застосовувані в даний час вентиляльні розрядники з резисторами на основі карбїду кремнію внаслідок недостатньої нелінійності матеріалу не дозволяють забезпечити достатню обмеження перенапруги[32]. Більш глибоке їх зниження вимагає зменшення нелінійного послідовного опору, що призводить до істотного збільшення супроводжуючих струмів. Іскрові проміжки не в змозі погасити великі струми. Включення нелінійних опорів під робочу напругу без іскрових проміжків виявляється неможливим внаслідок великого струму через нелінійний опір при фазній напрузі[33].

Застосування іскрових проміжків викликає додаткові труднощі, пов'язані з необхідністю зменшення супроводжуючого струму до величини надійного відключення проміжками, а також отримання пологої вольт-секундної характеристики розрядника.

Значне поліпшення захисних характеристик розрядників може бути досягнуто при відмові від використання іскрових проміжків. Це виявляється можливим при переході до резисторам з різко нелінійної вольт-амперної характеристикою і достатньою пропускнуою здатністю.

Таким вимогам відповідають варистори з напівпровідникового матеріалу на базі окису цинку. Розробка і масове виробництво в наступні роки цих варисторів дозволили розробити і захисні апарати з поліпшеними характеристиками. Такі апарати, звані обмежувачі перенапруги, в даний час випускаються в ряді розвинених країн світу. В Україні серійно випускаються обмежувачі перенапруги головним чином для мереж 6 – 110 кВ. На цей час, для мереж

					<i>БР 5.6.14.1.138 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

з ізольованою і резонансно заземленою нейтраллю апарати випускаються невеликими партіями, що обумовлено попитом енергосистем[34–36].

Високо нелінійні оксидно-цинкові варистори в даний час в основному випускаються у вигляді дисків. Основними виробниками варисторів у світі вважають АВВ та EPCOS.

Вольт-амперну характеристику нелінійних варисторів зазвичай апроксимують залежністю(3.3):

$$U = CI^{\alpha} \tag{3.3}$$

де, α - коефіцієнт нелінійності матеріалу (показник нелінійності).

Нелінійні варистори, виготовлені на основі окису цинку і використовуються в обмежниках перенапруги, характеризуються значно меншим показником нелінійності α , ніж карбидно-кремнієві, використовувані в вентилях розрядників. Слід зазначити, що показник α в сильному ступені залежить від величини струму, що протікає через опір, і зі збільшенням струму зростає [37].

Визначення коефіцієнта нелінійності α по вольт-амперних характеристиках варисторів має велику похибку через недостатню точності вимірювання напруги, що залишається. Щоб обчислити коефіцієнт нелінійності з підвищеною точністю використовується спеціальна схема, що дозволяє вимірювати імпульси струму в паралельно включених колонках варисторів, одна з яких є еталонною.

Вимірюючи величину опору, включеного послідовно з розглянутою колонкою, можна в широких межах варіювати в ній струм, в той час як в еталонної колонці струм зберігає свою амплітуду. Підвищення точності визначення напруги на досліджуваній колонці варисторів визначається високою точністю вимірювання струму і напруги на ній [38].

Це забезпечується контролем струму в еталонній колонці дисків (деяка похибка в його вимірі призводить до значно меншою похибки у визначенні

					БР 5.6.141.138 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

напруги внаслідок малого значення коефіцієнта α в залежно $U = CI\alpha$), також виміром з більшою точністю лінійного опору, що включається послідовно з досліджуваної колонкою. Середні значення коефіцієнта α , отримані за результатами вимірювань наведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Середні значення параметрів C і α оксидно-цинкових варисторів

i, A	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	100	500	1500
U/U_{100}	0,7	0,74	0,78	0,82	0,86	0,91	1	1,1	1,3
A	0,2					0,03	0,04	0,06	0,1
C/U_{100}	0,86						0,9	0,93	0,96

Як випливає з таблиці, мала величина α (0,015 ... 0,04), що визначає переваги оксидно-цинкових варисторів, охоплює область струмів від 10^{-6} до 102 А. Перебіг через варистори струмів, що перевищують 500 А, небажано, оскільки в цьому випадку різко зростає коефіцієнт нелінійності ($\alpha \geq 0,1$).

Вольт-амперна характеристика варисторів дозволяє комплектувати нелінійні обмежувачі перенапруг з поліпшеними захисними характеристиками без іскрових проміжків. Однак відсутність іскрових проміжків обумовлює протікання через ОПН струмів 50 Гц при робочій напрузі мережі. Надмірна величина цих струмів може привести до перегріву варисторів і виходу ОПН з ладу [39].

Струм, що протікає через обмежувачі перенапруг в нормальному режимі, містить ємнісну і активну складові. При великих градієнтах напруги різко зростає нелінійна провідність і активна складова струму, що призводить до суттєвого нагрівання варисторів. Критичне значення градієнта робочої напруги 1,0 кВ/см відповідає максимально допустимому току через варистор ~ 1 мА, що є в основному струмом провідності, що підтверджується осцилограмами струму через варистор при різних напружених 50 Гц.

4 ПРОВЕДЕННЯ РОЗРАХУНКІВ ДЛЯ ПЛ 6-35 КВ

4.1 Розрахунок числа відключень повітряної лінії 6-35 кВ при ураженні блискавкою

Розрахунок числа відключень повітряної лінії номіналом 6-35 кВ для різних типів опор: П 35-2П та У35-2Т. Розрахунок числа відключень для ПЛ на стандартних опорах наступний: для ліній 6-35 кВ сумарне число грозових вимкнень на рік буде складати (4.1):

$$n_{\Sigma} = n_{\text{пум}} + n_{\text{інд}} \quad (4.1)$$

де $n_{\text{пум}}, n_{\text{інд}}$ - питома (на 100 км і 100 грозових годин) число грозових відключень ПЛ від прямих ударів блискавки і внаслідок індукованих перенапруг.

Ці величини визначаються за формулами (4.2) та (4.3):

$$n_{\text{пум}} = N_{\text{пум}}^* [P_{\text{ПЗ}} \cdot P_{\text{Д}\Sigma} + (P_{\text{П2}} - P_{\text{ПЗ}})P_{\text{Д}}] (1 - P_{\text{АПВ}}) \quad (4.2)$$

$$n_{\text{інд}} = [N_{\text{пум}} \cdot P_{\text{Д}\Sigma} + (N_{\text{інд}} - N_{\text{інд3}})P_{\text{Д}}] (1 - P_{\text{АПВ}}) \quad (4.3)$$

де $P_{\text{П2}} - P_{\text{ПЗ}}$ - ймовірність двофазного і трифазного перекриттів ізоляції ПЛ та визначається за (4.4) та (4.5):

$N_{\text{пум}}$ - питома число прямих ударів блискавок у лінію на рік;

$P_{\text{Д}\Sigma}$ - ймовірність встановлення хоча б однієї дуги при трифазному перекритті.

$N_{\text{інд}}, N_{\text{інд3}}$ - питомі числа двофазних і трифазних перекриттів ;

					<i>БР 5.6.141.138 ПЗ</i>			
Змн.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата	<i>Аналіз систем блискавкозахисту повітряних ліній 6-35 кВ</i>	Лит.	Аркуш	Листів
Розроб.		Щербак					58	73
Перевір.		Лебединський				<i>ЕТЗ - 91с</i>		
Реценз.								
Н. Контр.		Никифоров						
Затверд.		Лебединський						

$$P_{II2} = \exp\left[-0,04 \frac{U_{\phi 50}^+}{z_{e2}(1-k_{12})}\right] \quad (4.4)$$

$$P_{II3} = \exp\left[-0,04 \frac{U_{\phi 50}^+}{z_{e3}(1-k_{12-3})}\right] \quad (4.5)$$

де z_{e2} - еквівалентний опір в точці удару при перекритті двох фаз та визначається за (4.6):

$U_{\phi 50}^+$ - імпульсна 50% розрядна напруга фазної ізоляції позитивної полярності на опорі;

k_{12-3} - те ж для двох раніше перекритих фаз, з'єднаних паралельно, з третьою фазою;

$$z_{e2} = \frac{\frac{z_m \cdot 0,5 z_{np} \cdot R_{zi}}{z_m + 0,5 z_{np}}}{\frac{z_m \cdot 0,5 z_{np}}{z_m + 0,5 z_{np}} + R_{zi}} \quad (4.6)$$

де z_{e3} еквівалентний опір в точці удару при перекритті трьох фаз та визначається за формулою (4.7):

$$z_{e3} = \frac{\frac{z_m \cdot R_{zi} \cdot z_{np} \cdot (1+k^{12})}{z_m + R_{zi}}}{\frac{z_m \cdot R_{zi}}{z_m + R_{zi}} + z_{np} \cdot \frac{1+k^{12}}{4}} \quad (4.7)$$

де k^{12} - коефіцієнт зв'язку між ураженою фазою і найбільш віддаленою від неї сусідньою фазою;

$P_{АПВ}$ - імовірність успішності АПВ в мережах 35 кВ.

Випадки двофазного і трифазного перекриття характеризується різними можливостями переходу імпульсного перекриття в коротке замикання. Для

					<i>БР 5.6.14.1.138 ПЗ</i>	Арк.
						59
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

двофазного перекриття ця ймовірність P_D може бути наближено визначена за формулою (4.8):

$$P_D \approx 1,6 \cdot \frac{U_{роб}}{l_{пер}} - 0,06 \quad (4.8)$$

де $l_{пер}$ - сумарна довжина шляху імпульсного перекриття, см;

$U_{роб}$ - ефективне значення робочої напруги вздовж шляху перекриття, кВ.

Обчислену ймовірність встановлення дуги приймають 0,1, якщо згідно з розрахунком вона менше, ніж це значення. Якщо за розрахунком d більше одиниці, її приймають 1,0. Таким чином, область ймовірностей P_D обмежується інтервалом $0,1 \leq P_D \leq 1,0$.

Передбачається, що розраховане значення d має місце при горінні лише однієї дуги, а при наявності дуг на сусідніх проміжках (з іншими джерелами робочої напруги) їх гасіння є незалежними подіями. При цьому ймовірність встановлення хоча б однієї дуги при трифазному перекритті можна приблизно оцінити за формулою (4.9):

$$P_{D\Sigma} = 2 \cdot P_D (1 - P_D) + P_D^2 = P_D (2 - P_D) \quad (4.9)$$

Слідом за встановленням дуги приходять в дію АПВ, яке з ймовірністю ліквідує наслідки грозового перекриття. Згідно досвіду експлуатації, для ліній 6-10 кВ $P_{АПВ} \approx 0,54$, а для ліній 35 кВ $P_{АПВ} \approx 0,7$.

Значення $N_{ін0}$, $N_{ін03}$ - питомих чисел двофазних і трифазних перекриттів внаслідок дії індукованої напруги визначається за формулами (4.10) - (4.13):

					<i>БР 5.6.14.1.138 ПЗ</i>	Арк.
						60
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$N_{інд} = \frac{936 \cdot h_{cp}}{U_{інд}} \exp\left(-\frac{U_{інд}}{260}\right) \quad (4.10)$$

$$N_{інд3} = \frac{936 \cdot h_{cp}}{U_{інд3}} \exp\left(-\frac{U_{інд3}}{260}\right) \quad (4.11)$$

$$U_{інд} = U_{50}^+ \frac{R_{zi} + 0,5z_{np}}{(1 - k_{12})0,5z_{np}} \quad (4.12)$$

$$U_{інд} = U_{50}^+ \frac{R_{zi} + z_{np} \frac{1 + k_{12}}{4}}{(1 - k_{12-3})z_{np} \frac{1 + k_{12}}{4}} \quad (4.13)$$

де $h_{cp} = h_{np} - \frac{2}{3}f$ - середня висота підвісу верхнього проводу;

h_{np} - висота його підвісу на опорі;

f провисання;

R_{zi} - імпульсний опір заземлення опори;

z_{np} - опір проводу.

Розглянемо розрахунок питомого числа (на 100 км і 100 грозових годин) відключень лінії 35 кВ на металевих опорах (тип проміжної опори П35 – 2П рис. 4.1). Для лінії: число ланцюгів на опорі - 2, висота опори - $h_{np} = 25$, висота підвісу верхнього проводу на опорі $h_{np} = 21$ м, розрахункова довжина прольоту $l_{np} = 270$ м, індуктивність опори $L_0 = 14,8$ мкГн, взаємна індуктивність каналу блискавки і опори $M_0 = 4,8$ мкГн, марка дроту АС-120, радіус проводу $R_{np} = 0,0076$ м, розрахункова стріла провисання проводу $f_{np} = 3$ м, імпульсний опір заземлення опори $R_{zi} = 25$ Ом.

Середню висоту верхнього проводу над землею h_{cp} визначаємо за формулою (4.14):

$$h_{cp} = h_{np} - \frac{2}{3}f = 21 - \frac{2}{3} \cdot 3 = 19 \quad (4.14)$$

					БР 5.6.14.138 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

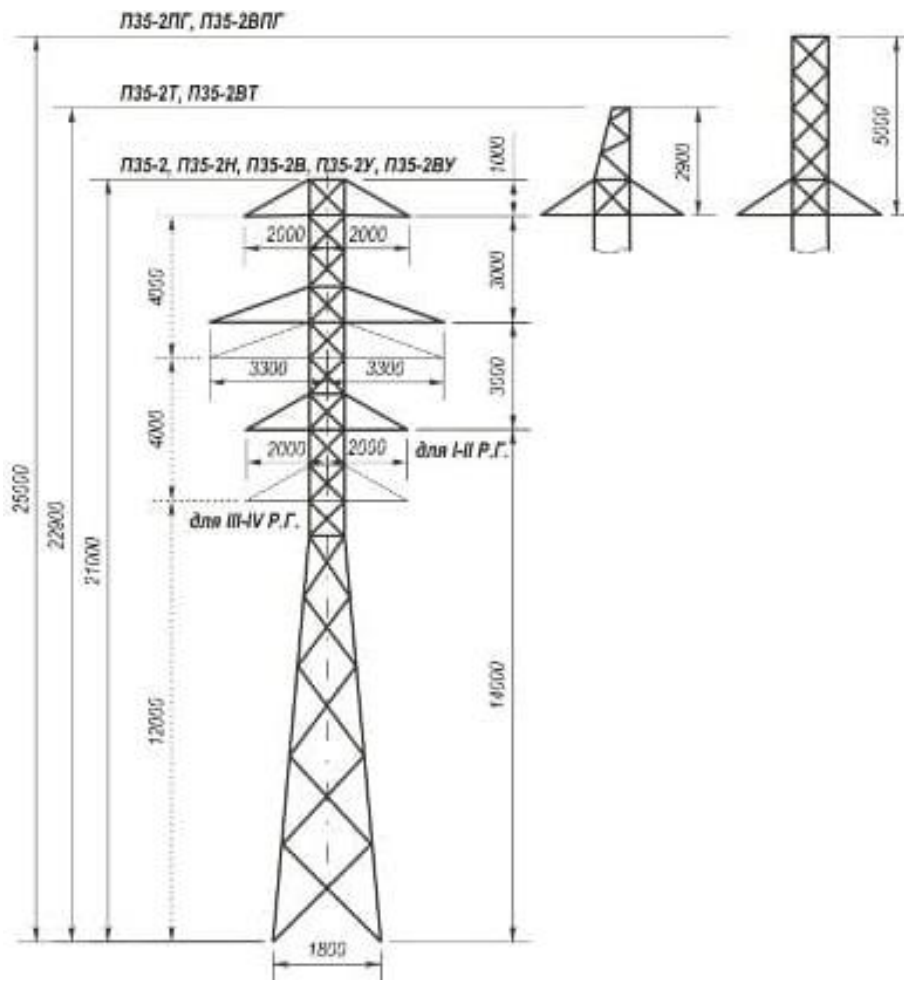


Рисунок 4.1 – Ескіз проміжної опори П-35

Можна визначити, що для ПЛ 35 кВ на проміжних опорах П-35-2Н, які мають на фазах по три ізолятора типу ПС 6-Б, хвильовий опір з урахуванням корони $z_{np} = 450 \text{ Ом}$, коефіцієнт зв'язку провід - другий провід $k_{12} = 0,29$, раніше перекритих двох фаз з третьою фазою $k_{12-3} = 0,33$; 50 % розрядна напруга фазної і міжфазних ізоляції при позитивній та негативній полярності відповідно $U_{cp50}^+ = 425 \text{ кВ}$, $U_{mf50}^+ = 740 \text{ кВ}$, $U_{mf50}^- = 850 \text{ кВ}$.

Еквівалентний опір в точці удару при перекритті двох і трьох фаз становить:

$$z_{e2} = \frac{\frac{300 \cdot 0,5 \cdot 450}{300 + 0,5 \cdot 450} \cdot 25}{\frac{300 \cdot 0,5 \cdot 450}{300 + 0,5 \cdot 450} + 25} = 19,9 \text{ Ом}$$

									Арк.
									62
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

$$z_{e3} = \frac{\frac{300 \cdot 25}{300 + 25} \cdot 450 \cdot \frac{1 + 0,29}{4}}{\frac{300 \cdot 25}{300 + 25} \cdot 450 \cdot \frac{1 + 0,29}{4}} = 19,9 \text{ Ом}$$

Ймовірності дворазового і триразового перекриттів ізоляції ПЛ розрахуємо за формулами (4.4) та (4.5):

$$P_{П2} = \exp\left(-0,04 \frac{425}{17,3(1 - 0,29)}\right) = 0,251$$

$$P_{П3} = \exp\left(-0,04 \frac{425}{19,9(1 - 0,33)}\right) = 0,279$$

Ймовірність переходу імпульсного перекриття в коротке замикання визначається за формулою (4.8):

$$P_{Д} = 1,6 \frac{35}{\sqrt{3} \cdot 51} - 0,06 = 0,57$$

Ймовірність встановлення хоча б однієї дуги при трифазному перекритті визначається за формулою (4.9):

$$P_{Д\Sigma} = P_{Д} (2 - P_{Д}) = 0,57(2 - 0,57) = 0,815$$

Ймовірність успішності АПВ в мережах 35 кВ приймемо $P_{АПВ} \approx 0,7$. Тоді коефіцієнт неуспішності АПВ буде дорівнювати $1 - P_{АПВ} = 1 - 0,7 = 0,3$. Питоме число прямих ударів блискавок у лінію на рік при $T_{год} = 100 \text{ год}$, $l = 100 \text{ км}$

$$N_{нум}^* = 6 \cdot h_{cp} = 6 \cdot 19 = 114$$

					БР 5.6.141.138 ПЗ	Арк.
						63
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Число грозових відключень ПЛ 35 кВ від прямих ударів блискавки за формулою (4.2):

$$n_{ПВМ} = 114 \cdot (0,251 \cdot 0,815 + (0,251 - 0,279)) \cdot 0,3 = 6,04 \frac{\text{відкл}}{\text{рік}}$$

Друга складова – $n_{інд}$. Спочатку розрахуємо $U_{інд}$ за (4.12), (4.13):

$$U_{інд} = \frac{425 \cdot (25 + 0,5 \cdot 450)}{(1 - 0,29) \cdot 0,5 \cdot 450} = 665 \text{ кВ}$$

$$U_{інд} = 740 \frac{25 + 450 \frac{1 + 0,29}{4}}{(1 - 0,33) \cdot 450 \frac{1 + 0,29}{4}} = 1221 \text{ кВ}$$

Питомі числа двофазних і трифазних перекриттів становлять:

$$N_{інд} = \frac{936 \cdot 19}{665} \exp\left(-\frac{665}{260}\right) = 2,07$$

$$N_{інд} = \frac{936 \cdot 19}{1221} \exp\left(-\frac{1221}{260}\right) = 0,132$$

Тому величина $n_{інд}$ набере значення:

$$n_{інд} = (0,12 \cdot 0,815 + (2,07 + 0,132) \cdot 0,57) \cdot 0,3 = 0,409 \frac{\text{відкл}}{\text{рік}}$$

Таким чином, сумарну кількість грозових відключень розглянутої лінії 35 кВ можна розрахувати за формулою (4.1):

					БР 5.6.14.1.138 ПЗ	Арк.
						64
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$n_{\Sigma} = 6,04 + 0,409 = 6,449 \frac{\text{відкл}}{\text{рік}}$$

Розрахунок числа відключень для ПЛ на компактних опорах У 35-2Т (рис. 4.2) проводиться за методикою, яка аналогічна методиці застосованої вище для ПЛ на стандартних опорах.

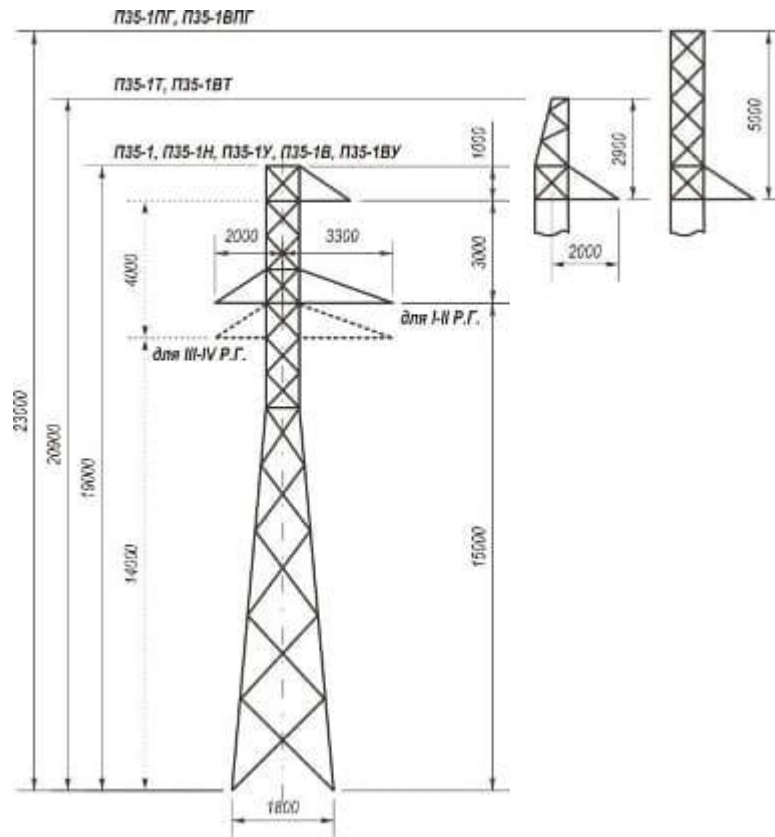


Рисунок 4.2 – Ескіз опори П35-1

Для лінії: число ланцюгів на опорі - 2, висота опори - $h = 21,45$ м, висота підвісу верхнього проводу на опорі $h_{np} = 15$ м, розрахункова довжина прольоту $l_{np} = 200$ м, індуктивність опори $L_0 = 14,8$ мкГн, взаємна індуктивність каналу блискавки і опори $M_0 = 4,8$ мкГн, марка дроту АС-95, радіус проводу $R_{np} = 0,0076$ м, розрахункова стріла провисання проводу $f_{np} = 3$ м, імпульсний опір заземлення опори $R_{zi} = 25$ Ом. Для порівняння отриманих розрахунків їх результати зведено до табл. 4.1.

										Арк.
										65
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР 5.6.14.1.138 ПЗ					

Таблиця 4.1– Результати розрахунків для опор

Величини	П 35- 2П	П35- 1
Середня висота верхнього проводу над землею	19	17
Еквівалентний опір в точці удару при перекритті двох і трьох фаз	17,3 19,9	17,1 19,6
Ймовірності дворазового і триразового перекриттів ізоляції	0,251 0,279	0,247 0,274
Імовірність переходу імпульсного перекриття в коротке замикання	0,815	0,865
Питоме число прямих ударів блискавок у лінію на рік	6,04	5,71
Питомі числа двофазних і трифазних перекриттів	2,07 0,132	1,77 0,107
Сумарна кількість грозових відключень	6,449	6,059

Висновок: провівши розрахунок грозових відключень повітряної лінії, можна стверджувати, що на сумарна кількість відключень лінії внаслідок ураження блискавкою суттєво впливає висота опори та середня висота підвісу проводу.

Опора типу П35-1 має сумарну кількість грозових відключень за рік 6,059 , а опора П 35 – 2П – $6,4 \frac{\text{відкл}}{\text{рік}}$. Таким чином другий тип опори, який має більшу кількість відключень на рік є пріоритетним до встановлення довгоіскрових розрядників.

					БР 5.6.141.138 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

ВИСНОВОК

По результатах бакалаврської роботи можна зробити наступні висновки.

- 1) Проаналізовано діючі європейські стандарти блискавкозахисту, котрі діють в Україні. Розглянуто методику визначення зон захисту за рекомендаціями МЕК (ІЕС 62305-2010): метод визначення зони захисту за захисним кутом, за методом фіктивної сфери (МФС);
- 2) Розглянуто питання блискавки як джерело атмосферної перенапруги, основні стадії утворення блискавки, щільність ударів блискавки в різних місцевостях. Розглянуто метод визначення числа уражень блискавки по об'єкту. Розглянуто загальні відомості про блискавкозахист, основні задачі по захисту ліній електропередачі (рис. 2.2). Розглянуто метод визначення числа відключень повітряної лінії під час удару блискавки у фазні проводи та схему розвитку грозових аварій ПЛ 110 кВ і вище (рис. 2.4).
- 3) Розглянуто питання аналізу грозостійкості ліній електропередачі 4-45 кВ та формулювання рекомендацій з її підвищення. На сьогоднішній день, існують лінії як на дерев'яних, залізобетонних так і металевих опорах. Кожна із цих опор має особисті властивості щодо блискавкозахисту та надійність. Розглянуто питання класифікації заходів захисту від перенапруги: технічні та організаційні; особливості блискавкозахисту з захищеними проводами в різних країнах (пункт 3.3). Розглянуто просторої захисту від перенапруги: іскровий проміжок, вентильний розрядник, нелінійні обмежувачі перенапруги.
- 4) Проведено розрахунок числа відключень повітряної лінії 6-35 кВ при ураженні блискавкою при різних опорах, табл. 4.1. Як видно з табл. 4.1, сумарна кількість відключень лінії внаслідок ураження блискавкою впливає висота опори та середня висота підвісу проводу.

					БР 5.6.141.138 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ Б В.2.5-38:2008. Інженерне обладнання будинків і споруд. Улаштування блискавкозахисту будівель і споруд (ІЕС 62305:2006 NEC). Київ: Мінрегіонбуд України, 2008. 63 р.
2. Захист від блискавки. Частина 1. Загальні принципи. ДСТУ ІЕС 62305-2:2012, 2012.
3. Захист від блискавки. Частина 2. Керування ризиками. ДСТУ ІЕС 62305-2:2012, 2012.
4. Захист від блискавки. Частина 3. Фізичні руйнування споруд та небезпека для життя людей. ДСТУ ІЕС 62305-3:2012, 2012.
5. Захист від блискавки. Частина 4. Електричні та електронні системи, розташовані в будинках і спорудах. ДСТУ EN 62305-4:2012, 2012.
6. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні. Затверджені Наказом МВС України 30.12.2014 N 1417. Зі змінами, що введено Наказом МВС України: 2016.
7. О.В, Катунін А.М., Лісін О.С. Особливості застосування методу захисного кута при проектуванні блискавкозахисту об'єктів // Збірник Наукових Праць. 2017. № 42.
8. ДСТУ Б В.2.5-38:2008. Улаштування блискавкозахисту Будівель і споруд (іес 62305:2006, neq). Київ: Мінрегіонбуд України, 2008.
9. Данильченко Д.О., Дривецький, Шевченко С.Ю. Захист повітряних ліній електропередавання 6-35 кВ від прямих ударів блискавок. Дніпро: Середняк Т. К., 2023. 155 р.
10. Панченко С.В., Акімов О.І., Бабаєв М.М. Електробезпека: Підручник. Харків: УкрДУЗТ, 2018. 295 р.
11. Карта грозової активності в Україні 2015-2019 в графічному форматі [Electronic resource]. URL: <https://fs-lps.com/karta-grozovoyi-aktyvnosti/> (accessed: 15.05.2023).

									Арк.
									68
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

12. Собчук В.С., Собчук Н.В., Бурикін О.Б. Перенапруги і блискавкозахист в електричних системах : навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2010. 145 р.
13. ПУЕ-2017. Правила улаштування електроустановок. Київ: Мінерговугілля України, 2017. 617 р.
14. Fahim S.R. et al. Self attention convolutional neural network with time series imaging based feature extraction for transmission line fault detection and classification // Electr. Power Syst. Res. 2020. Vol. 187. P. 106437.
15. Dobrea I. The Opportunity to Treat the Neutral Through the Resistor or Combined Compensation Coil - Resistor. IEEE, 2019.
16. Кирик В.В., Абдулаєв С.А. Захист повітряних ліній електропередавання напругою 35 кВ від наведених грозових перенапруг // «Електротехніка Та Електроенергетика». 2018. № 1. Р. 81–92.
17. 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 р.
18. Василюк С.В., Василюк К.С. Техніка високих напруг. Навчальний посібник. Рівне: НУВГП, 2018. 187 р.
19. ЗАТ «Завод «Південкабель» et al. Посібник з проектування та будівництва повітряних ліній напругою до 1 кВ із застосуванням самоутримних ізольованих проводів виробництва ЗАТ «Завод «Південкабель» та лінійної арматури Niled. Книга 1 Рекомендації щодо застосування самоутримних ізольованих проводів на повітряних лініях напругою до 1 кВ з урахуванням вимог ПУЕ редакції 2006 року. Київ, 2006. 60 р.
20. Short T.A. Monitoring Results of the Effectiveness of Surge Arrester Spacings on Distribution Line Protection // IEEE Trans Power Deliv. 1999. Vol. 14, № 3. P. 1142–1150.
21. Dalessandro Dr.F. A modern perspective on direct strike lightning protection. ERICO Lightning Technologies. Australia, 2011. 259 р.

										Арк.
										69
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР 5.6.14.1.138 ПЗ					

22. Lee R.E. et al. Prevention of Covered Conductor Burndown on Distribution Circuits - Arcing Protection Devices // IEEE Power Eng. Rev. 1982. Vol. PER-2, № 8. P. 18–19.

23. Washino M. et al. Development of current limiting arcing horn for prevention of lightning faults on distribution lines // IEEE Trans. Power Deliv. 1988. Vol. 3, № 1. P. 187–196.

24. Ibrahim M.E., Abd-Elhady A.M. Calculation of electric field and partial discharge activity reduction for covered conductor/high voltage insulator systems // Electr. Power Syst. Res. 2017. Vol. 144. P. 72–80.

25. Uzakov B. et al. To the structure of electricity losses in distribution networks 6 - 110 kV // E3S Web Conf. EDP Sciences, 2021. Vol. 289. P. 07022.

26. Chubu. Electric Utilizes Current Limiting Arcing Horn to Prevent Insulated Conductor Burn Down on Distribution System // Insul. News Mark. Rep. 1998. Vol. 6, № 4. P. 7–11.

27. Nakada K. et al. Energy absorption of surge arresters on power distribution lines due to direct lightning strokes-effects of an overhead ground wire and installation position of surge arresters // IEEE Trans. Power Deliv. 1997. Vol. 12, № 4. P. 1779–1785.

28. Podporkin G.V., Pilshikov V., Sivaev A. Lightning protection of medium voltage overhead lines by modular long-flashover arresters // Power Deliv. IEEE Trans. On. 2003. Vol. 18. P. 781–787.

29. Al-Maghalseh M.M.A. Evaluating the Reliability worth Indices of Electrical Medium Voltage Network: Case Study // Procedia Comput. Sci. 2018. Vol. 130. P. 744–752.

30. Podporkin G.V., Pilshikov V. APPLICATION OF LONG FLASHOVER ARRESTERS FOR IMPROVEMENT OF LIGHTNING PROTECTION AND OPERATING VOLTAGE RELIABILITY OF DISTRIBUTION LINES G. V. Podporkin, V. E. Pilshikov, A. D. Sivaev. 1999.

					БР 5.6.14.1.138 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

31. Винокурова Є.В., Ворона С.С., Кирик В.В. Оцінка наведеної напруги на лінії електропередавання напругою 10 кВ // Гідроенергетика України. 2014. № 4. Р. 42–43.
32. Meng P. et al. Novel zinc-oxide varistor with superior performance in voltage gradient and aging stability for surge arrester // J. Alloys Compd. 2019. Vol. 789. P. 948–952.
33. Орлович А.Ю. et al. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання. М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т. Кропивницький: Лисенко В.Ф, 2019. 272 р.
34. Дмитриев М.В. Применение ОПН для защиты изоляции ВЛ 6-750 кВ. Политехн, 2009.
35. Araújo M.A. et al. Decision-Making Support Method for the Preventive Substitution of Surge Arresters on Distribution Systems // J. Control Autom. Electr. Syst. 2019. Vol. 30, № 3. P. 391–401.
36. Clayton R.P., Robert C.S., Mark A.S. Introduction to Electromagnetic Compatibility. John Wiley & Sons, 2022.
37. Al-Maamori M.H. et al. Study the Efficiency of adsorption Leshman's Stain Dye on the surface of some metal oxides [Text]. Engineering Sci., 2013. Vol. 2. 16–21 p.
38. Sandeep. Current Research Trends in Electrical Discharge Machining: A Review [Text] // Res. J. Eng. Sci. –. 2013. Vol. 2, № 2. P. 56–60.
39. Shevchenko S.Y. et al. Overvoltage nonlinear: application, installation and choose: monograph. Kharkiv: Fort, 2015. 278 p.

					<i>БР 5.6.141.138 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71