



**Міністерство освіти і науки України**  
**ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІ-**  
**ВЕРСИТЕТ**  
**Факультет енергетики, робототехніки та**  
**комп'ютерних технологій**  
**Кафедра електропостачання та**  
**енергетичного менеджменту**

## **ЗАХИСТ ВІД ПЕРЕНАПРУГ**

**Навчально-методичний посібник**

**на тему:**

**«БЛИСКАВКОЗАХИСТ, ЗАХИСТ ВІД АТМОСФЕРНИХ**  
**ПЕРЕНАПРУГ ТА ЗАЗЕМЛЕННЯ БЛИСКАВКОВІД-**  
**ВОДІВ ПІДСТАНЦІЙ ТА ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДА-**  
**ВАННЯ»**

**для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої осві-**

**ти**

**денної форми навчання**

**зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка**  
**та електромеханіка»**

**Харків**  
**2024**

Міністерство освіти і науки України  
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет енергетики, робототехніки та  
комп'ютерних технологій  
Кафедра електропостачання та  
енергетичного менеджменту

## ЗАХИСТ ВІД ПЕРЕНАПРУГ

Навчально-методичний посібник  
на тему:

«Блискавкозахист, захист від атмосферних перенапруг та за-  
землення блискавковідводів підстанцій та ліній електропере-  
давання»

для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти  
денної форми навчання  
зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка»

Затверджено рішенням  
науково-методичної ради  
факультету енергетики,  
робототехніки та  
комп'ютерних технологій  
Протокол № 1 від  
30 вересня 2024 року

Харків  
2024

УДК 621.31

С 31

Схвалено на засіданні кафедри  
електропостачання та енергетичного менеджменту  
Протокол № 2 від 20.09.2024 року

**Рецензенти:**

**Н. Г. Тимчук**, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ДБТУ;

**Ю. М. Хандола**, канд. техн. наук, зав. кафедри електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та електротехніки ДБТУ.

С 31 Захист від перенапруг: навчально-метод. посібник на тему: «Блискавкозахист, захист від атмосферних перенапруг та заземлення блискавковідводів підстанцій та ліній електропередавання» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти денної форми навч. зі спец. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Держ. біотехнол. ун-т; авт.-уклад.: С. А. Попадченко, О. А. Савченко – Харків: [б. в.], 2024. – 122 с.

Навчально-методичний посібник розроблено відповідно до програми навчальної дисципліни. Видання включає теоретичну частину, алгоритм виконання лабораторної роботи, контрольні запитання та перелік рекомендованої літератури.

Видання призначена для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти денної форми навчання зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

**УДК 621.31**

**Відповідальний за випуск: О. О. Мірошник**, д-р техн. наук

© Попадченко С. А., Савченко О. А., 2024

© ДБТУ, 2024

## ЗМІСТ

	ВСТУП	6
1.	Електрика як атмосферне явище. Хмари і електричні процеси в них	7
2.	Вплив блискавки на об'єкт	16
3.	Заходи з грозозахисту повітряних ліній електропередавання (ПЛ)	21
4.	Конструктивне виконання блискавковідводів	22
5.	Заземлювачі	25
6.	Заземлювальні провідники	27
7.	Системи заземлення РП, ТП і опор повітряних ліній	28
8.	Конфігурація й розміри зон захисту отримані на основі моделей, експериментів та розрахунків	31
9.	Блискавковідводи і їх зони захисту	33
9.1.	Загальні вимоги до захисту електричних підстанцій від прямих ударів блискавки	33
9.2.	Блискавкозахист підстанцій і електричних машин високої напруги	38
9.3.	Зони захисту блискавковідводів і їх розрахунків	41
9.4.	Розрахунок зони захисту одиночного стрижневого блискавковідводу	41
9.5.	Приклад розрахунку зони захисту одиночного стрижневого блискавковідводу	44
9.6.	Розрахунок зон захисту подвійного стрижневого блискавковідводу однакової висоти	47
9.7.	Розрахунок зон захисту подвійного різновисо-	49

	кого стрижневого блискавковідводу	
9.8.	Визначення зон захисту багаторазового стрижневого блискавковідводу	51
9.9.	Розрахунок зон захисту одиночного тросового блискавковідводу	54
9.10.	Розрахунок зон захисту подвійного тросового блискавковідводу	55
9.11.	Захист об'єктів замкнутим тросовим блискавковідводом	58
9.12.	Захист об'єктів блискавкоприймальною сіткою	59
9.13.	Приклад розрахунку блискавкозахисту головної знижувальної підстанції (ГЗП) 35/10 кВ	62
9.14.	Завдання для розрахунку зон захисту різних видів блискавкозахисту	71
10.	Загальні принципи грозозахисту підстанцій	81
10.1.	Принципи захисту електрообладнання підстанцій від набігаючих хвиль грозового походження	83
10.2.	Основні характеристики ОПН	84
10.3.	Вибір ОПН для захисту обладнання підстанцій 6 ÷ 35 кВ	87
10.3.1.	Вибір найбільшої тривало допустимої робочої напруги	87
10.3.2.	Вибір енергоємності та струму пропускної здатності ОПН	91
10.3.3.	Вибір номінального розрядного струму ОПН.....93	93
10.3.4.	Визначення захисного рівня ОПН під час грозових перенапруг	94
11.	Приклади вибору ОПН	95
12.	Заземлюючі пристрої блискавковідводів і їх	106

	розрахунок	
12.1.	Загальні відомості про конструктивне виконання заземлюючого пристрою електричної підстанції напругою понад 1 кВ	106
12.2.	Розрахунок захисного заземлення	107
12.3	Варіанти індивідуального завдання	113
Додаток 1		114
Додаток 2		116
ЛІТЕРАТУРА		117

## ВСТУП

Цей навчальний посібник присвячено питанням блискавкозахисту, захисту від атмосферних перенапруг та заземленню блискавковідводів. Навчальний посібник покликаний розвинути у студентів навички розрахунку грозових перенапруг, захисту електрообладнання від прямих ударів блискавки і від набігаючих з ліній електропередачі хвиль та виробити вміння правильного вибору заходів захисту і оцінки їх ефективності. Достатній набір завдань і контрольних питань, електронне тестування дозволить студенту перевірити правильність засвоєння матеріалу при самостійній роботі.

Обмеження грозових і комутаційних перенапруг є одним з основних завдань електроенергетики, оскільки це дозволяє значно полегшити умови роботи ізоляції і в багатьох випадках скоротити ізоляцію, коли вона визначається перенапругами. Дійсно ізоляція в електричних мережах визначається впливом робочої напруги і перенапруги. Природно ізоляція в першу чергу визначається умовою надійної роботи при впливі робочої напруги. В ідеальному випадку, до якого слід прагнути, перенапруги повинні бути обмежені до такого рівня, при якому вони не чинили б впливу на ізоляцію - її розміри і якість. Це прагнення і визначає актуальність робіт щодо обмеження перенапруг. Розподільні електричні мережі (РМ) напругою 0,4-10 кВ в останні роки оснащуються електроустаткуванням, апаратами, пристроями, ізоляторами і проводами, виготовленими на новій сучасній технічній базі. Експлуатація таких мережевих об'єктів вимагає надійної системи захисту від грозових перенапруг з використанням сучасних технічних засобів. Розробка технічних засобів і методів захисту

від перенапруг пов'язана з кількісною оцінкою параметрів блискавки і ймовірного числа грозових пошкоджень.

## **1. Електрика як атмосферне явище. Хмари і електричні процеси в них**

При вивченні атмосферної електрики слід виділити два рівня електричних процесів в атмосфері.

Перший рівень пов'язаний з існуванням електричного поля в атмосфері в глобальному масштабі, а другий - з електричними явищами і процесами в хмарах.

Існують різні точки зору і теорії, пов'язані як з утворенням електричного поля в атмосфері землі, так і з електричними явищами в хмарах.

Одна з теорій пояснює наявність глобального електричного поля як поля сферичного конденсатора, утвореного шаром іоносфери високої провідності на висоті близько 60 км і поверхнею землі.

Електричний опір системи іоносфера - земля при ясній погоді оцінюється близько 200 Ом, а струм провідності - 1000 А. Передбачається, що компенсація заряду, що втрачається системою за рахунок струму провідності, здійснюється за рахунок процесів в грозових районах земної кулі, де електричне поле має напрям, протилежний спостережуваному в районах з ясною погодою.

Ця теорія має ряд істотних недоліків і погано узгоджується з експериментальними даними. Наприклад, іоносфера не є шаром з нескінченної провідністю, в якому відсутня ЕРС. В даний час вважається кращою [9] магнітно-електрична теорія, заснована на взаємодії електричних і магнітних явищ в атмосфері. Згідно з цією теорією, на висоті 100



км від землі в результаті взаємодії приливної циркуляції центральної атмосфери з іоносферною плазмою в присутності магнітного поля виникають горизонтальні електричні поля значної інтенсивності і відповідні їм струми.

Електричною зв'язком між землею і нижньою атмосферою з екваторіальним районом циркуляції струмів на великій висоті є грозові хмари, а самі грози є основним постачальником негативного заряду землі. Області ясної погоди є пасивною частиною загального електричного кола, по якій протікають невеликі струми витоку.

Таким чином, хмари є важливим елементом глобального електричного кола.

Для розуміння електричних процесів, що відбуваються в хмарах, необхідно мати хоча б основні уявлення про виникнення і розвитку хмар.

Газоподібна оболонка земної кулі (атмосфера) має товщину близько 1000 км, але основні процеси формування і розвитку хмар мають місце в тропосфері, що представляє собою частину атмосфери висотою  $7 \div 8$  км над полюсами,  $10 \div 11$  км в помірних широтах і  $14 \div 17$  км в тропічних широтах. Повітря тропосфери складається з чотирьох основних газів: азоту - 78,09%, кисню - 20,95%, аргону - 0,91%, вуглекислого газу - 0,03%. Основними домішками є водяна пара, озон, оксид вуглецю, тверді і рідкі частинки.

Велике значення в процесі утворення хмар має розподіл температури по висоті. У тропосфері з підвищенням висоти над землею температура повітря зменшується. Згідно з прийнятим міжнародним стандартному станом атмосфери температура повітря у землі дорівнює  $+15^{\circ}\text{C}$  і зменшується на  $6,5^{\circ}\text{C}$  при підйомі на 1 км до висоти 11 км, а вище постійна і дорівнює  $-65^{\circ}\text{C}$ .

Зміна температури повітря по висоті залежить від багатьох факторів, зокрема, від припливу і витрати променевої енергії, від її поглинання і відображення поверхнею землі, від занесення тепла або холоду атмосферними течіями, від виробничої діяльності і т.п.

Істотну роль в утворенні хмар грає інверсія температури, коли зазвичай спостерігається зменшення температури з висотою змінюється її зростанням (рис. 1).

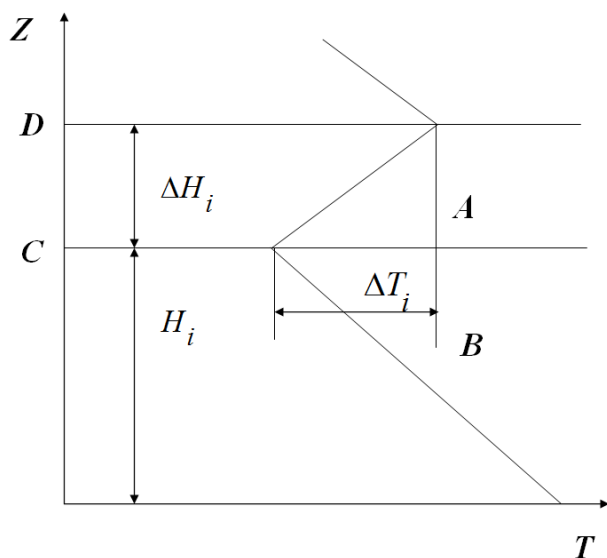


Рисунок 1- Інверсія температури:

A - шар інверсії; B - підінверсійний шар

Введені поняття:

висота інверсії - висота над землею  $H_i$  нижньої межі шару інверсії C;

товщина шару інверсії -  $\Delta H_i$ ;

інтенсивність інверсії - зміна температури в шарі інверсії  $\Delta T_i$ .

Причини виникнення інверсії різні, в зв'язку з чим розглядають такі види інверсії: *приземна, інверсія осідання і турбулентна*. У нічний час відбувається охолодження поверхні землі і повітря, що прилягає до неї [7 Горячкин].

В результаті більш високий шар повітря виявляється тепліше нижнього, що і створює приземну інверсію.

Інверсія осідання виникає наступним чином.

В атмосфері існують низхідні і висхідні потоки повітря. Можливі випадки, коли спадний потік повітря на певній висоті (наприклад, рівень D, рис. 1) починає розтікатися горизонтально. При цьому тиск в повітрі, що опускається, збільшується, що призводить до його нагрівання.

Тому температура повітря над рівнем С (рис. 1) буде вищою, ніж в області В.

*Турбулентна інверсія* може з'явитися після утворення інверсії осідання, якщо під межею С в області В виникне турбулентний рух повітря, в результаті чого низхідні рухи повітря приведуть до збільшення температури біля землі, а висхідні - до зменшення її у верхній частині області В біля межі С. Це призведе до збільшення інтенсивності інверсії.

Атмосфера не є ідеальним діелектриком. Електропровідність її визначається наявністю вільних іонів, концентрація яких визначається радіоактивним випромінюванням з поверхні землі, з повітря і впливом космічних променів. Під дією електричного поля в атмосфері протікає струм з густиною  $1,1 \cdot 10^{-11} \text{ А/м}^2$ .

Основну роль в утворенні і формуванні хмар відіграють вертикальні потоки повітря. В хмарах розрізняють: *висоту основи* (висота над землею нижньої межі хмари), *потуж-*

*ність* (відстань по висоті від нижньої межі хмари до верхньої) і *довжину* (відстань між межами хмари по горизонталі).

Повітря, піднімаючись вгору, потрапляє в область низьких температур, при яких водяна пара насичує повітря, і при подальшому зниженні температури відбувається конденсація водяної пари. Утворюється нижня межа хмари.

Але температура піднімається повітря все ще залишається вище температури навколишнього середовища, і він продовжує підніматися. На певній висоті він може потрапити в шар інверсії. Температура його виявляється нижче навколишнього середовища, і він прагне поширитися в горизонтальному напрямку, утворюючи верхню межу хмари.

Якщо швидкість потоку повітря велика, то він може пробити шар інверсії і утворити ще одну межу хмари на більш високому рівні. *Це один з механізмів утворення купчастих хмар.*

Крім купчастих хмар є хмари перисті, шаруваті.

Процеси утворення хмар досить складні і різноманітні. За характером процесів можна виділити [2] хмари фронтальні (перисті і шаруваті), турбулентного перемішування (шаруваті), осередкової циркуляції (перисто-купчасті і шарувато-купчасті) і вертикального розвитку (купчасті).

Фронтальні хмари утворюються при зустрічному русі і зіткненні теплої і холодної повітряних мас. На фронті холодного повітря відбувається витіснення по похилій поверхні теплого повітря, який піднімається вгору і, охолоджуючись, спочатку утворює купчасто-дошові хмари.

Потім, на висоті вище  $4,5 \div 5$  км, висхідний рух повітря накладається на горизонтальний, і утворюються купчасто-шаруваті хмари.

Хмари осередкової циркуляції виникають тоді, коли в атмосфері існують один над іншим два потоки з різними швидкостями і температурами.

Купчасто-дощова хмара в своєму розвитку проходить три стадії: початкову, стадію зрілості і стадію розпаду.

У початковій стадії переважають висхідні повітряні потоки;

в стадії зрілості спостерігаються висхідні і низхідні потоки, а в стадії розпаду переважають низхідні потоки.

Швидкість висхідних потоків може досягати 60 м / с. Швидкість низхідних потоків купчасто-дощової хмари рідко перевищує 10 м / с.

За фазовим складом хмари бувають краплинні (водяні), кристалічні (крижані) і змішані. Рідкі краплі можуть зустрічатися при позитивних і при негативних температурах аж до  $-40^{\circ}\text{C}$ . Крижані кристали утворюються тільки при мінусовій температурі. Хмарне повітря містить частинки, розмір яких знаходиться в межах від мікроскопічних ядер конденсації до градин розміром в декілька сантиметрів.

У процесі формування хмари частки набувають позитивного або негативного електричного заряду. Зарядка частинок є початковим етапом в процесі формування і накопичення зарядів в окремих частинах хмари або в хмарі в цілому.

Основні механізми електризації частинок наступні:  
іонна зарядка, контактна і поляризаційна.

За іонної зарядки частка захоплює іони з навколишнього її простору і набуває заряд того чи іншого знака. Цей вид електризації, як правило, переважає в початковій стадії розвитку хмари.

За контактної зарядки частка набуває заряд в результаті переходу носіїв заряду через межу дотичних частинок, що

володіють різними фізичними властивостями. Цей механізм є основним при формуванні в хмарах уніполярно заряджених областей.

Поляризаційний механізм електризації частинок полягає в наступному.

Частка, перебуваючи в зовнішньому електричному полі, поляризується, а потім з тих чи інших причин розділяється на дві частинки, що володіють різнойменними зарядами.

Наприклад, крапля води, потрапляючи в зовнішнє електричне поле, поляризується, орієнтується у напрямку поля і далі деформується аж до розриву, створюючи уніполярного заряджені краплі менших розмірів.

Можливі і інші механізми розділення зарядів.

Величезна кількість заряджених частинок, захоплюємося потоками повітря, активно беруть участь в процесі зарядки хмари як цілої і в процесі накопичення та формування заряду в окремих частинах хмари.

Тут також можна виділити наступні механізми зарядки хмар.

1. Зарядка хмари як об'єкту, що знаходиться в електричному полі атмосфери. Накопичення заряду обумовлено відмінністю провідності поза і всередині хмари. Крім того, відбувається поділ зарядів всередині хмари за рахунок його поляризації в зовнішньому полі.

2. Поділ різнойменно заряджених частинок, що володіють різною швидкістю осаджування. Наприклад, зважені частинки хмар і частки опадів. Після випадіння опадів хмара отримує уніполярний заряд.

3. Зарядка повітряними потоками конвективного походження, коли частинки одного знаку виносяться потужними

потоками повітря у верхню або будь-яку іншу частину хмари.

Хмари можуть бути: позитивно поляризованими, що мають у верхній частині позитивний, а в нижній частині негативний заряд; негативно поляризованими; зарядженими позитивно; зарядженими негативно. Однозарядними зазвичай є хмари невеликої товщини. Потужні хмари, як правило, багатозарядні.

Електрична провідність повітря в хмарах менше, ніж в безхмарній атмосфері, за рахунок захоплення іонів краплями води.

Грозові хмари можуть розвиватися з купчастих без опадів. В цьому випадку вгорі хмари в 75% випадків розташовується позитивний заряд, а внизу - негативний. Середня щільність об'ємного заряду в цих областях невелика: в 50% випадків вона складає  $5 \cdot 10^{-12} \div 5 \cdot 10^{-11}$  Кл/м<sup>3</sup>, напруженість в середньому не перевищує 500 В / м. Електрична провідність атмосфери в купчастих хмарах в кілька разів менше, ніж у вільній атмосфері.

Електрична структура купчасто-дошових хмар (зливові та грозові хмари), в цілому, подібна до структури купчастих хмар. Але основні заряди в купчасто-дошових хмарах великі і чітко виділені в порівнянні з купчастими хмарами.

Електричні заряди в хмарі створюються в основному в області між ізотермами  $0 \div -40$  °С. Для помірних широт середні значення основних зарядів грозової хмари становлять  $20 \div 25$  Кл при відстані між ними  $2 \div 3$  км. Середні значення густини об'ємного заряду знаходяться в межах від  $3 \cdot 10^{-9}$  до  $30 \cdot 10^{-9}$  Кл/м<sup>3</sup>, а в неоднорідностях - понад  $10^{-7}$  Кл/м<sup>3</sup>.

Середні значення напруженості поля всередині активної грозової хмари рівні  $0,1 \div 0,2$  МВ / м, а в неоднорідностях

вони можуть доходити до 1,0 МВ / м.

**Блискавка** - це електричний розряд, який може виникнути всередині хмари між різнойменно зарядженими його частинами; між різнойменно зарядженими хмарами; між хмарою і землею.

У середніх широтах 60 ÷ 70% із загального числа блискавок припадають на розряди всередині хмар або між хмарами і 30 ÷ 40% розрядів вражають землю. Більшість ударів блискавки (до 90%) розвиваються з негативно заряджених областей хмари і переносять на землю негативний заряд.

Вважають [5], що розряди блискавки в хмарі можливі при досягненні значень напруженості електричного поля 0,3 ÷ 0,4 МВ / м. В активних грозових хмарах потужністю 9 км вимірне значення провідності становить  $5 \cdot 10^{-11} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$ . Значення провідності всередині грозової хмари перевершують її значення поза хмари в 10 ÷ 100 разів.

Розряди блискавки виникають в стадії зрілості хмари, коли в ній існують сильні вертикальні потоки і спостерігаються опади. Найбільші значення зарядів і напруженості поля спостерігаються в хмарах, що мають складний фазовий склад (переохолоджені краплі, кристали, градини). Вертикальна потужність грозової хмари зазвичай перевищує 5 км і може досягати 13 ÷ 15 км. Середня тривалість опадів і електричної активності окремого грозового осередку становить 30 ÷ 40 хв. При розряді через канал блискавки переноситься в середньому 20 ÷ 30 Кл, а в інтенсивних грозах до 100 Кл.

На сьогоднішній день надійної фізичної теорії, що узгоджується з усією сукупністю відомих експериментальних фактів, немає. У спрощеному варіанті можна уявити процес формування зарядів в грозовій хмарі наступним чином [6].

В якості основного способу накопичення зарядів в гро-



зовій хмарі приймається механізм поділу зарядів на частинках, що володіють різною швидкістю осадження.

На початковій стадії розвитку хмари діє іонна зарядка крапель в біполярній атмосфері. Крапельки висхідними потоками виносяться в верхню частину хмари. Хмарні краплі розміром 100 мкм і менше не можуть опуститися вниз і накопичуються нижче вершини хмари.

Замерзання переохолоджених крапель супроводжується їх вибухом і електризацією. Крапля замерзає з поверхні.

Заряд розділяється: рідка фаза заряджається негативно, а крижана - позитивно. Внаслідок різного коефіцієнту лінійного розширення крижана оболонка руйнується, і легкі кристали несуться потоками повітря. У верхній частині купчасті хмари створюються умови для накопичення великої кількості порівняно великих крижаних часток. Процес їх укрупнення пов'язаний з сублімацією водяної пари і, в основному, з взаємодією з переохолодженими краплями. Крижані кристали перетворюються в крижану крупу і град. Зіткнення хмарних частинок з градинами є ефективними механізмами електризації в грозовому хмарі. При зіткненні хмарних крапель з градинами електризація виникає в двох випадках: при розбризкуванні крапель і при їх вибуху в результаті зіткнення з крижаною поверхнею градин. Поділ зарядів відбувається через падіння градин під дією сили тяжіння і підйому малих частинок в висхідних потоках повітря, тому у верхній частині хмари формується позитивний заряд, а в нижній - негативний.

## **2. Вплив блискавки на об'єкт**

З метою запобігання наслідкам прямого удару та вторинних проявів блискавки необхідно забезпечити захист повітряних ліній, підстанцій, будівель, споруд, окремо розташова-

них установок . При виборі пристроїв блискавкозахисту для різних категорій будівель та споруд враховують важливість об'єкта, його висоту, розташування серед сусідніх об'єктів, інтенсивність грозової активності та інші характеристики.

Пристрої блискавкозахисту повинні відповідати таким основним вимогам:

- відповідність типу блискавкозахисту характеру виробничого процесу, а також на об'єкті в цілому;
- можливість типізації конструктивних елементів блискавкозахисту;
- значний строк служби;
- надійність дій усіх елементів блискавкозахисту;
- наочність монтажу, створення умов безпеки для персоналу об'єкта;
- легкий доступ до всіх елементів для проведення контролю, ремонту або відновлення;
- відносно нескладна експлуатація.

При оцінюванні показників надійності грозозахисту лінії, або середнього числа грозових відключень ліній в рік  $n_{\Sigma}$  враховується залежність перекриття лінії від законів розподілення амплітуди і крутизни струмів блискавки, а також від міста удару блискавки.

Тому ефективність грозозахисту спочатку визначають окремо для наступних розрахункових випадків ураження лінії [17]:

- 1) удар блискавки в провід з наступним перекриттям ізоляції між проводом і опорю або між проводами;
- 2) удар блискавки у вершину опори з наступним перекриттям ізоляції між опорю і проводом;
- 3) удар блискавки в прогін троса з наступним перекриттям ізоляції з троса на провід або на землю;

4) удар блискавки поблизу лінії електропередачі, що супроводжується появою індукованих перенапруг.

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

Удар блискавки в середню частину прогону троса призводить до розподілення струму між сусідніми опорами, що полегшує умови роботи гірлянд ізоляторів.

Але при цьому на тросі в місці удару можуть виникнути перенапруги, що створюють небезпеку перекриття повітряного проміжку між тросом і проводом в середині прогону.

При ударі блискавки поблизу лінії індуковані перенапруги, що виникають, суттєво впливають тільки на число грозових відключень ліній напругою до 110 кВ.

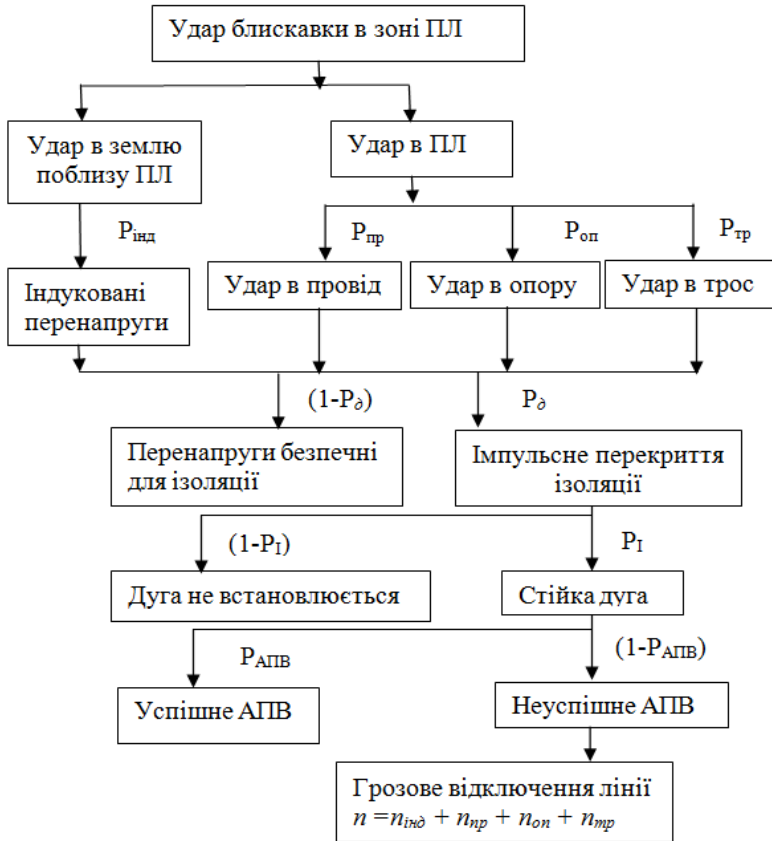


Рисунок 2 – Логічна схема розвитку грозових аварій ПЛ 110 кВ і вище.

Розрахунок числа грозових відключень лінії при кожному із перерахованих впливів, надасть можливість визначити сумарне число грозових відключень на рік:

$$n_{\Sigma} = n_{пр} + n_o + n_{тр} + n_{інд},$$

де  $n_{пр}, n_o, n_{тр}$  - число відключень при ударах блискавки в провід, в опору і трос;

$n_{інд}$  - число відключень лінії внаслідок індукованих перенапруг.

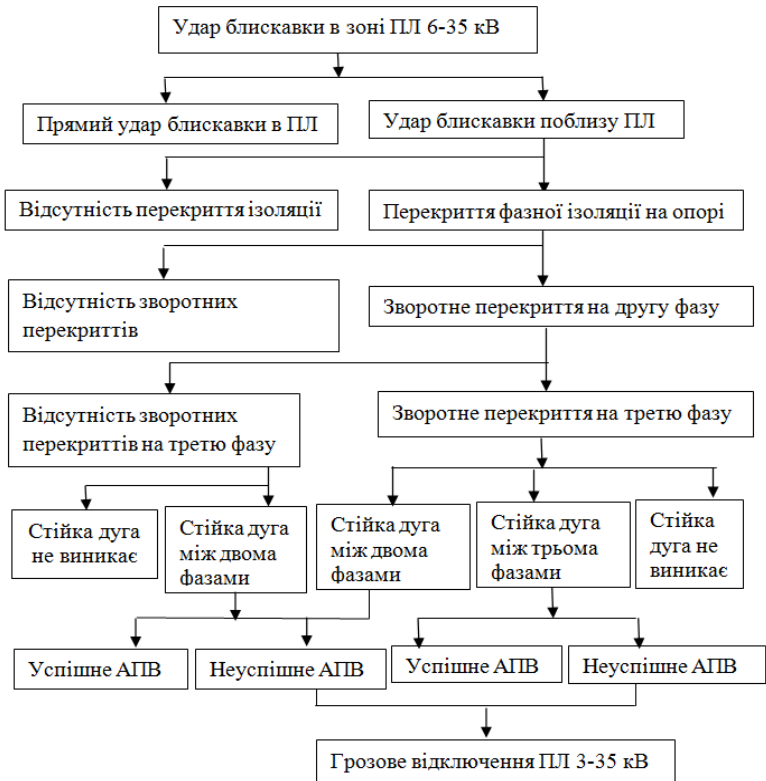


Рисунок 3 – Логічна схема розвитку грозових аварій ПЛЛ 6-35 кВ.

Число відключень ПЛЛ 110 кВ і вище для перерахованих випадків визначається за формулами:

$$n_{np} = N_{ПНВ} \cdot P_{np} \cdot P_{1np} \cdot P_{д} \cdot (1 - P_{АПВ});$$

$$n_{o} = N_{ПНВ} \cdot P_{on} \cdot P_{1on} \cdot P_{д} \cdot (1 - P_{АПВ});$$

$$n_{TP} = N_{ПНВ} \cdot P_{TP} \cdot P_{1TP} \cdot P_{д} \cdot (1 - P_{АПВ});$$

$$n_{інд} = N_{інд} \cdot P_{д} \cdot (1 - P_{АПВ}),$$

де  $N_{ПМБ}$  - число прямих ударів блискавки в лінію (провода, троси, опори);

$P_{np}$  - ймовірність прориву блискавки на фазні провода мимо тросів(за відсутності тросів  $P_{np}=1$ );

$P_{on}, P_{TP}$  - ймовірність ударів в опору і трос відповідно;

$P_{1np}, P_{1on}, P_{1TP}$  - ймовірність перекриття гірлянди при ударі блискавки в провода, опору і трос відповідно;

$P_d$  - ймовірність встановлення дуги при перекритті;

$P_{АПВ}$  - ймовірність успішності АПВ;

$N_{ind}$  - очікувана річна кількість небезпечних індукованих перенапруг з амплітудою, що перевищує імпульсну міцність ізоляції за позитивної полярності.

### **3. Заходи з грозозахисту повітряних ліній електропередачі (ПЛ).**

Надійність грозозахисту ПЛ забезпечується:

- підвіскою грозозахисних тросів з кутами захисту 20-30°;
- зниженням імпульсного опору заземлення опор;
- підвищенням імпульсної міцності ізоляції ліній і зниженням ймовірності встановлення силової дуги (у випадку використання дерев'яних траверс і опор);
- застосуванням ізольованої нейтралі або дугогасної котушки;
- використанням автоматичного повторного включення (АПВ) ліній;

Грозозахисні троси на лініях 6-500 кВ не використовуються для:

- всіх ПЛ напругою до 35 кВ;
- ліній 110 кВ на дерев'яних опорах;
- в районах з числом грозових годин на рік менше 20;
- окремих ділянок ПЛ з питомим опором ґрунтів більше  $10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;
- ділянок траси з розрахунковою товщиною стінки оже-леді більше 20 мм.

Додаткових заходів захисту на повітряних лініях електропередачі вимагають:

- перетин ПЛ між собою (розрядниками трубчастими (РТ), релейним захистом (РЗ) з АПВ);
- перетин ПЛ з лініями зв'язку, трамвайними лініями і лініями електрифікованих залізних доріг (РТ, РЗ з АПВ);
- опори ПЛ зі зниженою електричною міцністю (РТ, розрядником вентиляним (РВ), ОПН);
- високі опори перехідних прогонів (троси, зниження опорів заземлення, посилення ізоляції, РТ, РВ, ОПН);
- відгалуження до підстанцій на відпайках і роз'єднувачі на лініях для секціонування (троси, РТ, РВ, ОПН);
- кабельні вставки на ПЛ (РТ, РВ, ОПН).

#### **4. Конструктивне виконання блискавковідводів**

Відокремлені стрижневі блискавковідводи виконуються залізобетонними і металевими у вигляді складових решітчастих конструкцій. Рекомендується встановлювати блискавковідводи у вигляді конструкцій без розтяжок, що вільно стоять. Блискавкоприймачі повинні витримувати термічні і електричні впливи струму блискавки. Стрижневі і однодротові тросові блискавкоприймачі виконують перерізом 50-100 мм<sup>2</sup>.

Поперечний переріз сталених багатодрових тросів повинен бути не менше 35 мм<sup>2</sup>.

Допустимі мінімальні перерізи струмовідводів вказані в таблиці 1 з урахуванням різної ступені корозії всередині і назовні споруди.

Блискавкоприймачі і струмовідводи захищаються від корозії фарбуванням. Багатодрові сталені троси оцинковуються. З'єднання частин струмовідводів між собою, а також з блискавкоприймачами і заземлювачами здійснюється в основному зварюванням.

Конструктивно блискавковідвід складається з трьох основних частин:

– блискавкоприймача, який безпосередньо сприймає удар блискавки;

Таблиця 1 – Мінімальні перерізи струмовідводів.

Профіль струмовідводів	Місце розміщення струмовідводу		
	Всередині споруди	Назовні споруди	В землі
Круглі і троси:			
Діаметр, мм	5	6	6
Прямокутні:			
переріз, мм <sup>2</sup>	24	48	48
товщина, мм	3	4	4
Кутова сталь:			
переріз, мм <sup>2</sup>	24	48	48
Товщина полок, мм	2	2,5	4
Труби:			
товщина стінок, мм	1,5	2,5	3,5

– струмовідводу (спуску), що з'єднує блискавкоприймач з заземлювачем, та заземлювача, через який струм блискавки переходить безпосередньо в землю.



Вертикальна конструкція, як правило, стовп або щогла, або частина споруди, що призначена для закріплення блискавкоприймачів і струмовідводу, називається опорою. Опори можуть бути дерев'яними, металевими або залізобетонними. Блискавковідводи бувають стрижневими, тросовими, сітчастими, настінними та покрівельними.

Основні конструкції стрижневих збірних блискавковідводів наведені на рис. 2.

Складові частини заземлювальних пристроїв (заземлювачі, заземлювальні провідники, головні заземлювальні шини) повинні бути вибрані і змонтовані так, щоб:

- надійно і довго служити для виконання вимог до захисту від ураження електричним струмом;

- протікання через них струмів, що зумовлені замиканнями на землю, та струмів витоку не створювали небезпеки (термічної, термомеханічної, електромеханічної, ураження електричним струмом);

- забезпечити виконання вимог до заземлювальних пристроїв функціонального і(або) блискавкозахисного заземлення, якщо використовується спільна система заземлення. У цьому випадку, насамперед, повинні бути виконані вимоги до захисного заземлення.

Визначати характеристики заземлювального пристрою слід з урахуванням конкретних умов експлуатації (зокрема, параметрів ґрунту і сезонних змін питомого опору шарів землі через висихання та промерзання ґрунту, що властиві для найбільш несприятливих погодних умов місцевості, в якій розміщений даний заземлювальний пристрій).

Якщо при виконанні заземлювального пристрою застосовуються провідники із різних матеріалів, треба враховувати можливість електролітичної корозії.

Допустимі розміри одиночних конструкцій заземлювачів залізобетонних фундаментів, рекомендовані конструкції і мінімально допустимі перерізи окремо розташованих блискавковідводів:

- один (і більше) залізобетонний підніжник (рисунок 3 а) або одна (і більше) залізобетонна паля (рисунок 3 б);
- одна (і більше) заглиблена в землю стійка залізобетонної опори (рисунок 3 в);
- залізобетонний фундамент довільної форми з площею поверхні контакту з землею не менше 10 м<sup>2</sup>;
- штучний заземлювач, який складається з трьох і більше вертикальних електродів, об'єднаний горизонтальним електродом (рисунок 3 г).

## **5. Заземлювачі**

При спорудженні заземлювального пристрою можуть бути використані:

а) природні заземлювачі:

- металеві і залізобетонні конструкції будинків та споруд, які знаходяться в контакті із землею, в тому числі залізобетонні фундаменти, які мають гідроізоляційні покриття, в неагресивних, малоагресивних та середньоагресивних середовищах;
- свинцеві оболонки прокладених у землі кабелів, а також інші довговічні металеві покриття кабелів, з яких забезпечено стікання струму замикання у землю; інші провідні частини, які розміщені в землі і забезпечують виконання вимог, що наведені в ПУЕ, наприклад, обсадні труби артезіанських колодязів, свердловин, шурфів;

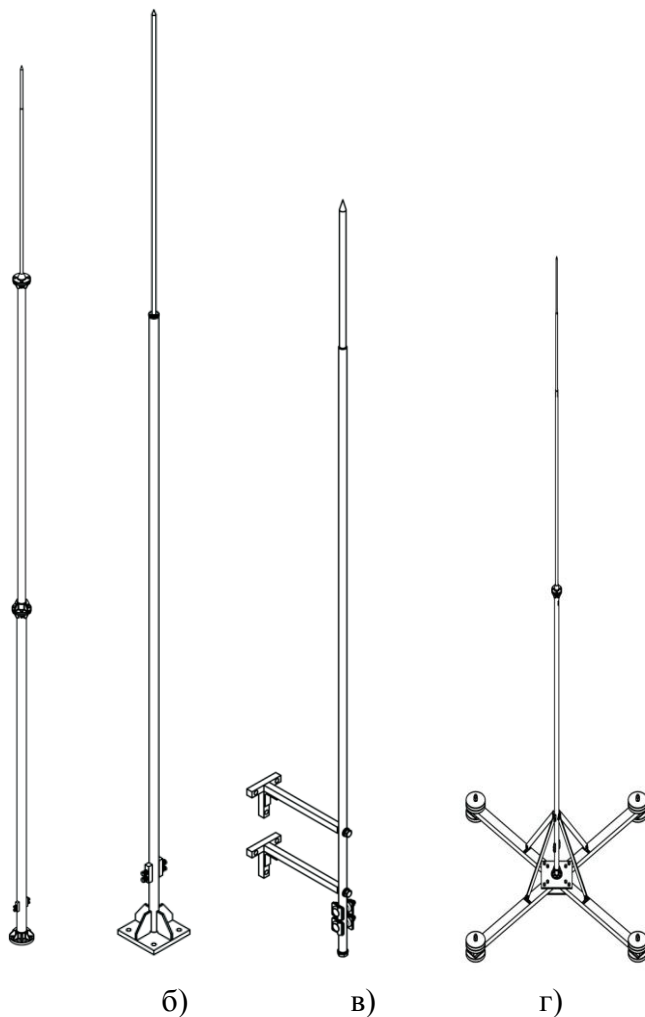


Рисунок 2 - Конструкції стрижневих збірних блискавко-відводів:

а – на фланцях ( 2-13, 5 м); б – на плитах (2-13, 5 м);

в - на кронштейнах( 1-13, 5 м); г – що вільно стоять, на опорах( 4-7, 5 м).

б) штучні заземлювачі:

– стержні, штаби, профіль, канати тощо;

– металеві ґратчасті конструкції, що укладаються у фундамент будинків та споруд під час будівництва (фундаментні заземлювачі).

Матеріал і розміри заземлювачів повинні забезпечувати стійкість заземлювачів до корозії і їх механічну міцність.

Кількість заземлювачів, їх розміщення і габаритні показники повинні забезпечувати виконання вимог до опору заземлювального пристрою.

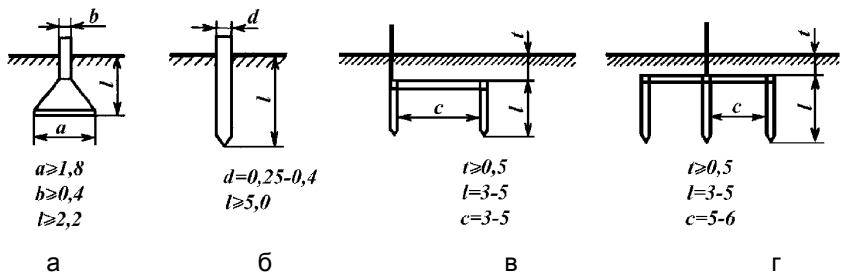


Рисунок 3 - Конструкції заземлювачів окремо розташованих блискавковідводів

## 6. Заземлювальні провідники

Характеристики заземлювальних провідників (матеріал, переріз) повинні сприяти виконанню вимог до опору заземлювальних пристроїв, що наведені в [4], та забезпечувати термічну стійкість цих провідників і їх механічну міцність.

В якості заземлювальних слід, як правило, застосовувати мідні, сталеві та алюмінієві провідники.

Для захисту заземлювальних провідників повинні бути вжиті заходи, які наведені в [4], з метою забезпечення захисту захисних провідників.

Використання заземлювальних провідників для інших цілей (крім заземлення) не допускається.

Для виконання заземлення і (або) основної системи зрівнювання потенціалів у будинку (споруді) повинна бути встановлена **головна заземлювальна шина**, до якої слід приєднати провідні частини, що зазначені.

Головна заземлювальна шина повинна бути термічно і корозійностійкою та мати високу механічну міцність та провідність. Вертикальні заземлювачі можуть розміщуватися в декількох паралельних рядах або по контуру, як правило, прямокутному.

## **7. Системи заземлення РП, ТП і опор повітряних ліній.**

Для рівномірного розподілу потенціалу на майдані електроустановки застосовують заземлення контурного типу.

Система заземлення розподільного пункту на 12 клітинок і розподіл потенціалу в розрізі А - А показані на рисунку нижче.

Розподіл потенціалу всередині контуру виходить значно рівномірніше, ніж при одиночному трубчастому заземлювачі, внаслідок чого зменшуються напруги дотику і кроку.

Заземлюючий пристрій контурного типу складається з сталевих труб (заземлювачів) діаметром 50 мм, довжиною 2,5 - 3 метри, з'єднаних між собою заземлюючими провідниками, виконаними зі сталевих шин перерізом 40 x 4 мм.

Шини прокладають на глибині 0,5 - 0,8 метра, труби забивають з таким розрахунком, щоб верх труби знаходився від поверхні землі на глибині 0,5 - 0,7 метра. Усередині розподі-

льного пункту прокладена магістраль заземлення, виконана зі смужової сталі перерізом  $25 \times 4 \text{ мм}^2$ .

Магістраль заземлення з'єднана з заземлювачами сталевими шинами в чотирьох місцях. Металеві корпуси обладнання приєднують до магістралі заземлення відгалуженнями. Також виконують систему заземлення трансформаторної підстанції.

При питомому опорі ґрунту  $1 \times 104 \text{ Ом}$  на сантиметр опір заземлення 16 заземлювачів  $R_z = 5,4 \text{ Ом}$ , заземлюючих провідників зі сталевих шин  $R_{ш}$  довжиною понад 50 метрів -  $8,5 \text{ Ом}$ .

Якщо опір заземлення броні чотирьох кабелів ( $R_k$ ), що заходять напругою вище 1000В прийняти рівним 2 Ом, то опір заземлення системи, показаної на верхньому рисунку, буде:

$$\frac{5,4 \cdot 8,5 \cdot 2}{5,4 \cdot 8,5 + 5,4 \cdot 2 + 8,5 \cdot 2} = 1,24 \text{ Ом}$$

і при розрахунковому струмі замикання на землю  $I_3 = 100\text{А}$  буде відповідати вимогам ПУЕ.

Заземлення опор повітряних ліній і щоглових підстанцій виконують забиванням в ґрунт 2 - 10 заземлювачів, що представляють собою кутову сталь  $50 \times 50 \times 5 \text{ мм}$  довжиною 2,5 метри і з'єднаних між собою сталевими шинами  $4 \times 25 \text{ мм}$ . Кількість заземлювачів залежить від питомого опору ґрунту і визначається проектом.

Від заземлювачів до металевих конструкцій щоглових підстанцій і опор, що підлягають заземленню, по опорам прокладають заземлюючі спуски.

Діаметр заземлюючого спуску для повітряної лінії напругою до 1 кВ повинен бути не менше 6 мм, для лінії 6 – 10 кВ - не менше 10 мм, переріз не менше  $35 \text{ мм}^2$ .

Захисна дія блискавковідводу характеризується ймовірністю прориву блискавки, яка знижується відповідно до зменшення відстані між блискавковідводом та об'єктом.

Визначення ймовірності прориву для кожної окремої споруди складне, тому в практиці проектування використовуються зони захисту блискавковідводів.

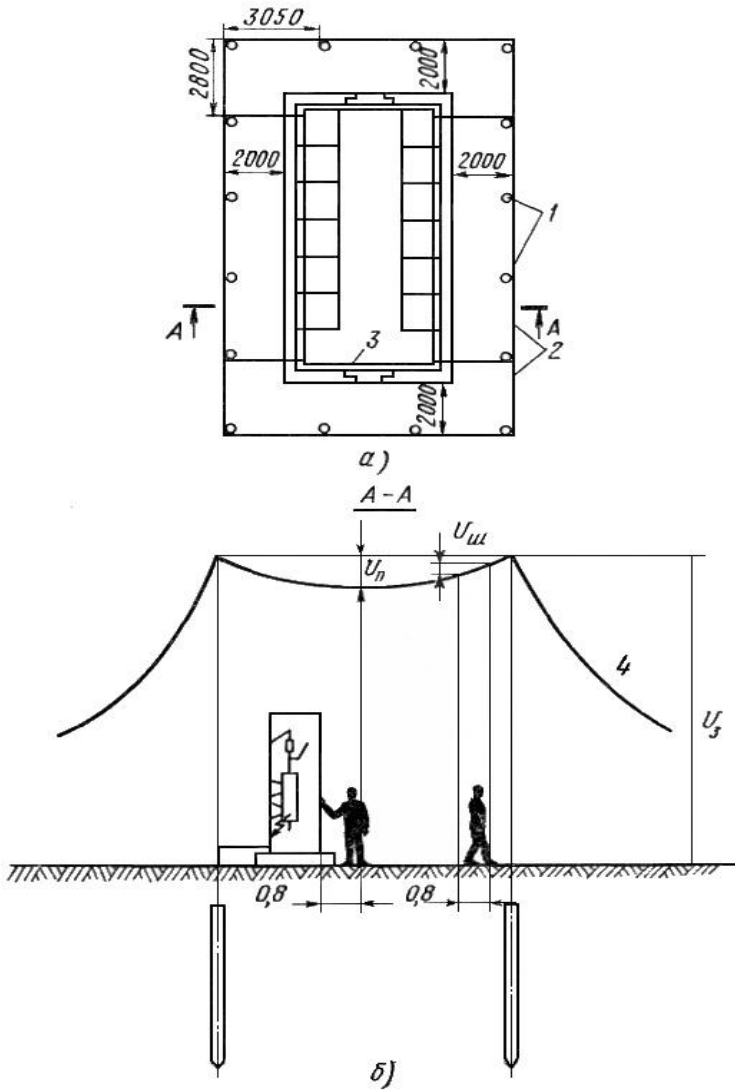


Рисунок 4 - Система заземлення РП (а) і розподіл потенціалу (б): 1 - заземлювач з труб, 2 - сталеві шини, 3 - магістраль заземлення всередині РП, 4 - крива розподілу потенціалу .



## 8. Конфігурація й розміри зон захисту отримані на основі моделей, експериментів та розрахунків.

При ударі блискавки в об'єкт струм блискавки чинить теплові, механічні та електромагнітні впливи.

Удари блискавки в наземні об'єкти часто супроводжуються пожежами, механічними руйнуваннями, пошкодженнями електрообладнання, відключеннями ліній електропередачі і т.п.

Кількість тепла, що виділяється в провіднику при проходженні струму багаторазової блискавки, що складається з  $m$  одиничних розрядів, можна оцінити за формулою [8]

$$Q \cong 0,121 \cdot I_{\text{сеп}} \cdot r \cdot \sum_{\kappa=1}^m q_{\kappa}, \quad (1)$$

де  $I_{\text{сеп}}$  - середній струм багаторазової блискавки, кА;

$r$  - активний опір провідника з урахуванням поверхневого ефекту;

$\sum q_{\kappa}$  - загальний заряд багаторазової блискавки, Кл;

$q_{\kappa}$  - заряд, що переноситься в землю, Кл, під час  $\kappa$ -го одиничного розряду.

Температура, °С, до якої нагрівається провідник,

$$t = \frac{l \cdot 5 \cdot k \cdot \rho \cdot I_{\text{сеп}} \cdot \sum_{\kappa=1}^m q_{\kappa}}{S^2 \cdot \gamma \cdot C}, \quad (2)$$

де  $l$  - довжина провідника, м;

$k$  - коефіцієнт, що враховує вплив поверхневого ефекту;

$\rho$  - питомий опір провідника, Ом·м;

$S$  - переріз провідника, м<sup>2</sup>;

$\gamma$  - питома маса провідника, кг / м<sup>3</sup>;

$C$  - питома теплоємність, кДж/(кг·°С).

Мінімальний переріз провідника, що забезпечує відсутність його руйнування при проходженні струму блискавки, зазвичай приймається рівним  $50 \text{ мм}^2$ . Сталевий провідник з таким перерізом при найбільш інтенсивних розрядах протягом 1 с нагрівається до декількох сотень градусів.

При ударах блискавки в об'єкти з поганою провідністю (цегляні будівлі, дерева, дерев'яні опори і ін.) можливі серйозні руйнування. Це пов'язано з тим, що струм блискавки переважно проходить по шляхах підвищеної провідності, які зазвичай знаходяться у внутрішніх частинах об'єкта завдяки його зволоженню. За рахунок нагрівання і випаровування вологи струмом блискавки всередині об'єкта відбувається різке збільшення тиску, яке і призводить до його руйнування. Бетонні або залізобетонні конструкції при ударі блискавки можуть бути пробиті, що зазвичай призводить до руйнування, зниження механічної міцності або до деформації. Тому всі стрижні залізобетонної конструкції повинні бути електрично пов'язані між собою з обох кінців і з'єднані з блискавкозахисним пристроєм, а сталева арматура надійно заземлена. Неармовані або слабко армовані бетонні конструкції, щоб уникнути їх руйнування повинні бути захищені від прямих ударів блискавки.

Крім впливів на об'єкт прямих ударів блискавки існують так звані вторинні впливи, створювані електричними і магнітними полями, що виникають при формуванні розряду блискавки. Розряд блискавки супроводжується появою в просторі магнітного поля, що змінюється в часі, яке індукує в контурах, утворених з різних протяжних металевих предметів (трубопроводів, електричних проводок і ін.), електрорушійну силу, значення якої залежить від: параметрів струму блискавки; розмірів і конфігурації контуру;

взаємного розташування каналу блискавки і контуру.

У незамкнених контурах і в контурах, контакти яких недостатньо надійні, в місцях з'єднання окремих елементів контуру або в місцях їх зближення під впливом індукованої ЕРС можливе виникнення сильного іскріння і нагрівання.

Під дією електричного поля лідера блискавки, що наближається до землі, на металевих конструкціях будівель і споруд (металевих покрівлях, балках, фермах, підкранових шляхах і т.п.) з'являються надлишкові пов'язані заряди.

При головному розряді блискавки ці заряди звільнюються і виникає різниця потенціалів між металевими конструкціями і землею або заземленими предметами, здатна пробити повітряні проміжки довжиною до декількох сантиметрів.

Крім того, при розрядах блискавок високий потенціал може бути занесений в будівлі і споруди по повітряних лініях, металевим надземним та підземним комунікаціям. Вторинні прояви прямого удару блискавки становлять небезпеку для вибухонебезпечних і пожежонебезпечних будівель, споруд, виробництв.

Занесення високих потенціалів із зовнішніх комунікацій всередину будівель і споруд становить небезпеку для людей, що знаходяться там, може викликати пробій ізоляції електропроводки, також для інформаційних систем, систем управління, контролю, автоматики.

Для електронних пристроїв, встановлених в об'єктах різного призначення, потрібен спеціальний захист.

## **9. Блискавковідводи і їх зони захисту**

### **9.1. Загальні вимоги до захисту електричних підстанцій від прямих ударів блискавки**

Захист електричних підстанцій від прямих ударів блискавки повинен виконуватися в повній відповідності з вимогами Правил улаштування електроустановок (ПУЕ) [1] та інших нормативних документів [14, 15] і здійснюватися за допомогою стрижневих і тросових блискавковідводів, підключених до відповідного заземлювального пристрою.

На даний час в Україні діє одночасно 2 нормативних документи з розрахунку та проектування системи блискавкозахисту, якими можна користуватись:

1) ДСТУ Б.В.2.5-38:2008 «Інженерне обладнання будинків і споруд. Улаштування блискавкозахисту будівель і споруд»

2) ДСТУ EN 62305:2012 «Блискавкозахист», який складається з 4-х розділів:

- ДСТУ EN 62305-1:2012 «Загальні принципи»
- ДСТУ EN 62305-2:2012 «Керування ризиками»
- ДСТУ EN 62305-3:2012 «Фізичні руйнування споруд та безпека для життя людей»
- ДСТУ EN 62305-4:2012 «Електричні та електронні системи, розташовані в будинках і спорудах»

**ДСТУ EN 62305:2012 «Блискавкозахист» (європейський стандарт ІЕС 62305-2010) введений в дію як національний стандарт від 01.08.2012 згідно наказу Міністерства Економічного розвитку і торгівлі України № 640 від 28 травня 2012-го року.**

Система блискавкозахисту (СБЗ) складається із зовнішньої і внутрішньої систем блискавкозахисту.

**Зовнішня система блискавкозахисту — частина СБЗ, що складається з блискавкоприймачів, доземних провідників і заземлювачів.**

Зовнішня СБЗ призначена для того, щоб вловлювати прямий удар блискавки в будівлю (блискавкоприймачем), безпечно проводити струм блискавки в землю (використовуючи доземні провідники) та розсіювати струм блискавки в землі (використовуючи заземлюючі пристрої).

**Внутрішня система блискавкозахисту** призначена для вирівнювання потенціалів в струмопровідних комунікаціях та захисту електричного та електронного обладнання від перенапруг, спричинених ударом блискавки в будівлю чи поблизу неї. Основним пристроєм системи внутрішнього блискавкозахисту є ПЗП (Пристрій захисту від імпульсних перенапруг).

Згідно ДСТУ EN 62305:2012 «Блискавкозахист» існує **4 рівні блискавкозахисту (РБЗ)**, які відповідають 4-м класам СБЗ, і кожен з яких характеризується:

- параметрами блискавки;
- радіусом сфери, що котиться, розмірами комірки сітки, значенням кута захисту;
- типовими відстанями між струмовідводами і кільцевими провідниками;
- мінімальною довжиною заземлювачів.

**1-й рівень СБЗ (LPS I)** використовують для розрахунку блискавкозахисту будівель та споруд, в яких наявні вибухонебезпечні зони класів 1, 2, 20, 21. Надійність захисту від удару блискавки для LPS I становить 0,99...0,999.

**2-й рівень СБЗ (LPS II)** використовують для розрахунку блискавкозахисту будівель та споруд, в яких наявні пожежонебезпечні зони; будівель обчислювальних центрів, в яких знаходиться чутливе до перенапруг електронне обладнання. Надійність захисту від удару блискавки для LPS I становить 0,95...0,99.

**3-й рівень СБЗ (LPS III)** найчастіше використовують для розрахунку блискавкозахисту багатоповерхових житлових будинків, офісних центрів, готелів чи інших громадських будівель, промислових та виробничих будівель, в яких немає пожежо- та вибухонебезпечних зон. Надійність захисту від удару блискавки для LPS IV становить 0,9..0,95.

**4-й рівень СБЗ (LPS IV)** найчастіше підходить для розрахунку блискавкозахисту невеликих приватних будинків та господарських будівель. Надійність захисту від удару блискавки для LPS IV становить не нижче 0,85.

**Блискавковідвід** означає одне і теж, що грозозахист або блискавкозахист і відрізняється від **громовідводу**, яким називають частіше тільки блискавкоуловлюючу частину системи захисту будівель і споруд. Тобто блискавковідвід - це «блискавкоприймач + струмовідвід + заземлення», або зовнішня складова системи. Якщо подивитися на схему будь-якого комплексного блискавкозахисту, будь то приватний будинок або будівля промислового, офісно-адміністративного призначення, то це її частина, яка призначена саме для захисту від прямих ударів блискавки.



Захисна дія блискавковідводів заснована на вибірковій властивості блискавки вражати найвищі і добре заземлені об'єкти в порівнянні з розташованими поруч спорудами меншої висоти.

Призначення блискавковідводів - сприйняти переважну кількість ударів блискавки в межах території, що захищається і відвести струм блискавки в землю.

Від прямих ударів блискавки повинні бути захищені наступні об'єкти електричних підстанцій:

- відкриті розподільні пристрої (ВРП), в тому числі шинні мости і гнучкі зв'язки;
- будівлі окремого пункту управління (ОПУ) і закритого розподільчого пристрою (ЗРП);
- будівлі трансформаторної башти, маслогосподарства, нафтогосподарства, компресорної;
- резервуари з паливними рідинами або газами.

Захист від прямих ударів блискавки металевих маслобаків здійснюється шляхом їх заземлення, якщо товщина верх-

ньої кришки 4 мм і вище. В іншому випадку баки захищаються стрижневими блискавковідводами.

Відповідно до ПУЕ [1] від прямих ударів блискавки не захищаються:

- підстанції 20 і 35 кВ з трансформаторами одиничною потужністю 1,6 МВА та менш незалежно від кількості трансформаторів і від числа грозових годин на рік;

- всі відкриті розподільні пристрої підстанцій 20 і 35 кВ в районах з числом грозових годин на рік не більше 20;

- відкриті розподільні пристрої й підстанції до 220 кВ включно, розміщені на майданчиках з еквівалентним питомим опором землі в грозовий сезон більше 2000 Ом при числі грозових годин на рік не більше 20. Будівлі закритих розподільних пристроїв і підстанцій підлягають захисту від прямих ударів блискавки в районах з числом грозових годин на рік більше 20. Захист цих будівель, що мають металеву покрівлю, слід виконувати шляхом їх заземлення. При наявності залізобетонної покрівлі і безперервного електричного зв'язку окремих їх елементів захист виконується заземленням їх арматури.

Захист будівель закритих розподільних пристроїв і підстанцій, дах яких не має металевих або залізобетонних покриттів з безперервним електричним зв'язком окремих їх елементів, слід виконувати стрижневими блискавковідводами або укладанням блискавкоприймальної сітки безпосередньо на даху будівель.

При установці стрижневих блискавковідводів на будівлі, що захищається, від кожного блискавковідводу повинні бути прокладені не менше ніж два струмовідводи по протилежних сторонах будівлі. При блискавкозахисті будівель і споруд I-ї і II-ї категорій (по вибухонебезпечності і пожежонебезпеці)



повинні бути передбачені захисні заходи від вторинних проявів блискавки, пов'язаних з дією на об'єкт електромагнітного поля близьких розрядів, занесення всередину приміщення по металевим конструкціям високого потенціалу і т. п.

## **9. 2. Блискавкозахист підстанцій і електричних машин високої напруги**

Надійність захисту електричних станцій і підстанцій від грозових перенапруг повинна бути значно вище надійності блискавкозахисту ЛЕП. Це визначається порівняно більшим збитком від грозових перенапруг на підстанціях, ніж на лініях. Внутрішня ізоляція силових трансформаторів і іншого підстанційного обладнання має менші запаси електричної міцності порівняно з ізоляцією ліній і не має властивостей самовідновлення після погашення дуги грозового перекриття[14].

Захист обладнання підстанцій від прямих ударів блискавки забезпечується стрижневими блискавковідводами.

Крім того, необхідно здійснення захисту від хвиль перенапруг, що виникають на лініях, що відходять від підстанцій при ударах блискавки в провода або опори цих ліній.

Захист від хвиль перенапруг, що набігають заснований на виборі ОПН або розрядників з відповідними захисними характеристиками, виборі їх кількості і місця установки, а також посилення захисту підходів лінії для зниження числа хвиль, що набігають з більшою крутизною напруги на фронті.

Як і для ЛЕП, для порівняння ефективності різних заходів з грозозахисту підстанцій застосовується ряд критеріїв.

**Рівень грозостійкості**, як і для ЛЕП, визначається верхніми межами амплітуди струму блискавки при прямих ударах в підстанцію, при яких не відбувається прямого або зворотного перекриття між струмопровідними і заземленими части-

нами об'єкту. Рівень грозостійкості дозволяє оцінити ймовірність пошкодження обладнання на підстанції при прямому ударі блискавки в блискавковідвід або при прориві блискавки на обладнання, що захищається, минаючи блискавковідводи.

Для оцінки ймовірності пошкодження від хвиль перенапруг, що набігають на підстанцію використовувати рівень грозостійкості в якості критерію стає неможливим, так як амплітуди перенапруг в різних точках підстанції суттєво залежать не тільки від амплітуди, але і від крутизни фронту хвиль перенапруг, що набігають і від інших факторів.

**Крива небезпечних хвиль** представляє собою межу області безпечних сполучень амплітуди і крутизни(або довжини фронту) хвиль, що дійшли до підстанції. Ймовірність пошкодження обладнання підстанції внаслідок хвиль перенапруг, що набігають може бути визначена шляхом інтегрування щільності ймовірності всіх можливих сполучень їх амплітуди і крутизни по області, що розміщена вище кривої небезпечних хвиль.

**Показник надійності грозозахисту** є більш об'єктивним критерієм ефективності грозозахисту підстанції. Він визначається як середнє очікуване число років безаварійної роботи підстанції при грозових впливах. Показник надійності грозозахисту може бути розрахований за формулою:

$$\tau = \frac{1}{n_{np} + n_{ze} + n_l + n_{nidh}} \cong \frac{1}{n_l + n_{nidh}}, \quad (3)$$

де  $n_{np}$  - очікуване середньорічне число перевищень допустимого рівня перенапруг в наслідок проривів блискавки на підстанцію;

$I_{зв}$  - те ж в наслідок зворотних перекриттів при ударах блискавки в блискавковідводи і заземлюючі конструкції підстанції;

$I_{л}$  - те ж в наслідок ударів блискавки в лінії за межами захищеного підходу;

$I_{нідх}$  - те ж в наслідок ударів блискавки в лінію в межах захищеного підходу.

При установці блискавковідводів у відповідності з ПУЕ і забезпеченні їх малого опору заземлення складові  $I_{np}$  і  $I_{зв}$  виявляються значно меншими, ніж  $I_{л}$  і  $I_{нідх}$  і в подальшому можуть не враховуватись

### **9.3. Зони захисту блискавковідводів і їх розрахунок.**

Методика вибору і розрахунок системи блискавкозахисту від прямих ударів блискавки засновані на визначенні зони захисту, під яким розуміється деякий простір навколо блискавковідводу, всередині якого будь-яка споруда захищена від прямих ударів блискавки з надійністю не нижче заданої.

Система блискавкозахисту розробляється за рекомендаціями [5, 9, 10].

Розрахунок типових зон захисту спеціальних об'єктів, до яких відносяться електричні підстанції, проводиться для наступних значень надійності захисту РЗ: 0,9; 0,99; 0,999.

Розрахункове значення надійності захисту підстанції вибирається залежно від ступеня відповідальності об'єктів, що захищаються, тяжкості збитків, що виникають при його ураженні, інтенсивності грозової діяльності і ін.

#### 9. 4. Розрахунок зони захисту одиночного стрижневого блискавковідводу.

Стандартною зоною захисту одиночного стрижневого блискавковідводу висотою  $h$  є круговий конус висотою  $h_0 < h$ , вершина якого збігається з вертикальною віссю блискавковідводу (рис. 1).

Габарити зони визначаються двома параметрами: висотою конуса  $h_0$  і радіусом конуса на рівні землі  $r_0$ .

Наведені нижче розрахункові формули придатні для блискавковідводів висотою до 150 м.

Напівширина  $r_x$  зони захисту необхідної надійності на висоті  $h_x$  від поверхні землі визначається виразом:

$$r_x = \frac{r_0 \cdot (h_0 - h_x)}{h_0}. \quad (4)$$

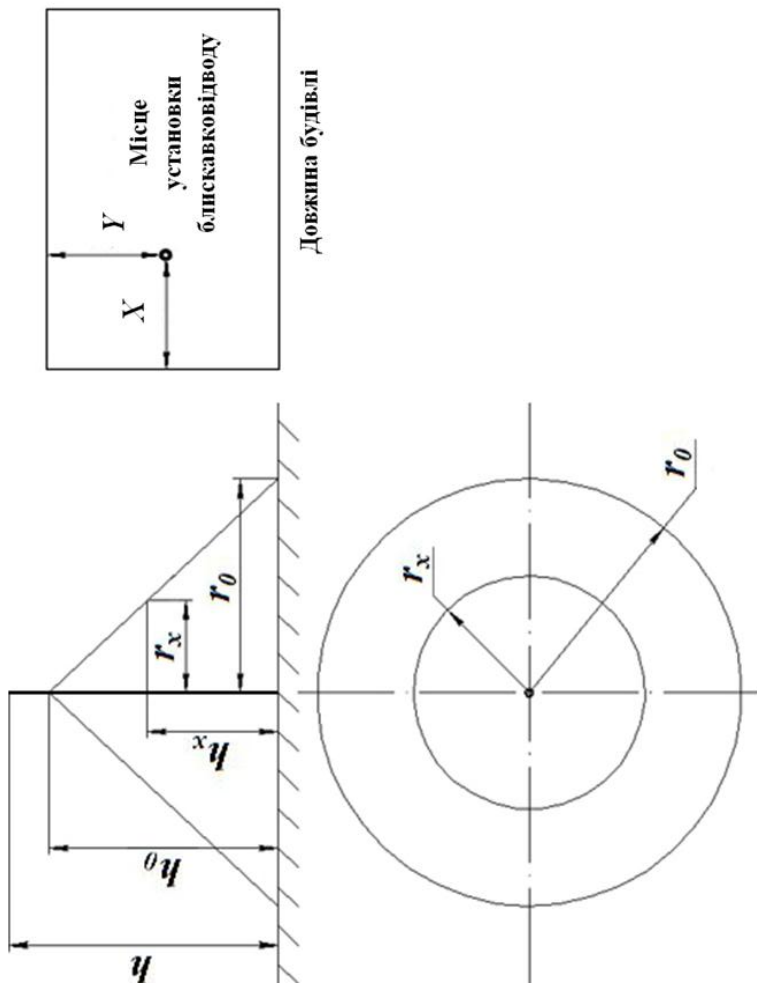
При більш високих блискавковідводах слід користуватися спеціальною методикою розрахунку.

Очікувана кількість уражень  $N$  блискавкою в рік проводиться за формулами:

для зосереджених будівель і споруд (димові труби, вишки, башти):

$$N = 9 \cdot \pi \cdot h_x^2 \cdot n \cdot 10^{-6}, \quad (5)$$

де  $n$  - середньорічне число ударів блискавки в  $1 \text{ км}^2$  земної поверхні в місці знаходження будівлі або споруди,  $1 / \text{км}^2 \cdot \text{рік}$ ;



Ширина будівлі

Довжина будівлі

Рисунок 1 – Зона захисту одиночного стрижневого блискавковідводу.

Таблиця 1– Розрахункові формули для визначення висоти і радіусу конусу для блискавковідводів висотою до 150 м.

Надій-ність захис-ту	Висота блискавко-відводу $h$ , м	Висота конусу $h_0$ , м	Радіус конусу $r_0$ , м
0,9	От 0 до 100	$0,85h$	$1,2h$
	От 100 до 150	$0,85h$	$(1,2 \cdot 10^{-3}(h-100))h$
0,99	От 0 до 30	$0,8h$	$0,8h$
	От 30 до 100	$0,8h$	$(0,8 - 1,43 \cdot 10^{-3}(h-30))h$
	От 100 до 150	$(0,8 \cdot 10^{-3}(h-100))h$	$0,7h$
0,999	От 0 до 30	$0,7h$	$0,6h$
	От 30 до 100	$(0,7 - 7,14 \cdot 10^{-4}(h-30))h$	$(0,6 - 1,43 \cdot 10^{-3}(h-30))h$
	От 100 до 150	$(0,65 \cdot 10^{-3}(h-100))h$	$(0,5 - 2 \cdot 10^{-3}(h-100))h$

для будівель і споруд прямокутної форми

$$N = [(B + 6h_x)(A + 6h_x) - 7,7 \cdot \pi \cdot h_x^2] \cdot n \cdot 10^{-6}, \quad (6)$$

де  $A$  - довжина об'єкта, м;  $B$  - ширина об'єкта, м.  
для протяжних об'єктів

$$N = 6h_x \cdot A \cdot n \cdot 10^{-6}. \quad (7)$$

Вибір типу зони захисту здійснюється відповідно до [1, 7] в залежності від призначення, географічного розташування, вибухо- і пожежонебезпеки об'єкту, що захищається, а також з урахуванням середньої тривалості гроз в рік.

### 9. 5. Приклад розрахунку зони захисту одиночного стрижневого блискавковідводу

Вихідні дані для розрахунку зони захисту одиночного стрижневого блискавковідводу зведені в табл. 2.

Стандартною зоною захисту одиночного стрижневого блискавковідводу висотою  $h$  є круговий конус висотою  $h_0 < h$ , вершина якого збігається з вертикальною віссю блискавковідводу (рис. 2).

Габарити зони визначаються двома параметрами: висотою конуса  $h_0$  і радіусом конуса на рівні землі  $r_0$ .

За ступенем надійності захисту розрізняють два типи зон:

А - ступінь надійності захисту перевищує 99,5%;

Б - ступінь надійності захисту становить 95-99,5%.

Очікувана кількість уражень  $N$  блискавкою в рік проводиться за формулами для будівель і споруд прямокутної форми:

$$N = [(B + 6h_x)(A + 6h_x) - 7,7h_x^2] \cdot n \cdot 10^{-6}, \quad (8)$$

де  $A$  – довжина об'єкту, м;

$B$  – ширина об'єкту, м.

За формулою (1) отримуємо очікувану кількість уражень блискавкою в рік  $N = 0.0125675$  уражень/рік.

Залежно від  $N$  і  $t_{cp}$  з [1] визначаємо необхідний тип зони блискавкозахисту (зона А).

Зв'язки між параметрами блискавковідводу в залежності від типу зон захисту визначені формулами для зони А:

$$h_0 = 0,85h;$$

$$r_0 = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot h) \cdot h;$$

$$r_x = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3} h) \cdot (h - 1,2h_x)$$

$$r_x = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot 40) \cdot (40 - 1,2 \cdot 15) = 22,4 \text{ м.}$$

де  $r_x$  – радіус горизонтального перерізу на висоті об'єкту, що захищається, м;

$h_x$  – найбільша висота споруди, що захищається, м.

Розрахункові формули (4) - (8) придатні для блискавковідводів висотою до 150 м. При більш високих блискавковід-

водах слід користуватися спеціальною методикою розрахунку.

Таблиця 2 - Дані для розрахунку зони захисту одиночного стрижневого блискавковідводу.

Позна-чення параметру	Найменування параметру	Одиниці вимірювання	Значення параметру	Джерела
A	Довжина об'єкту	м	45	Технічні умови
B	Ширина об'єкту	м	22	Технічні умови
$h_x$	Висота об'єкту	м	15	Технічні умови
$n$	Питома щільність ударів блискавки в землю	1/км <sup>2</sup> ·год	1	[1]
$t_{cp}$	Середня тривалість гроз на рік	год	20	[1]

Приймаючи розрахункову висоту блискавковідводу рівній 40 метрів відповідно до (4) - (8), отримуємо:

$$h_0 = 0,85 \cdot 45 = 38,25 \text{ м};$$

$$h_0 = 0,85 \cdot 40 = 34 \text{ м};$$

$$r_0 = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot 45) \cdot 45 = 45,9 \text{ м};$$

$$r_0 = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot 40) \cdot 40 = 40,8 \text{ м};$$

$$r_x = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot 45) \cdot (45 - 1,2 \cdot 15) = 27,27 \text{ м};$$

$$r_0 = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot 40) \cdot (40 - 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 15) = 22,4 \text{ м}.$$



При перевірці захищеності об'єкту перевіряється дотримання умови:

$$\frac{\sqrt{A^2 + B^2}}{2} < r_x. \quad (9)$$

$$\frac{\sqrt{45^2 + 20^2}}{2} = 25,04 < 27,27$$

Умова (8) дотримується.

Зона захисту одиночного стрижневого блискавковідводу з вказівкою розмірів наведена на рис. 2.

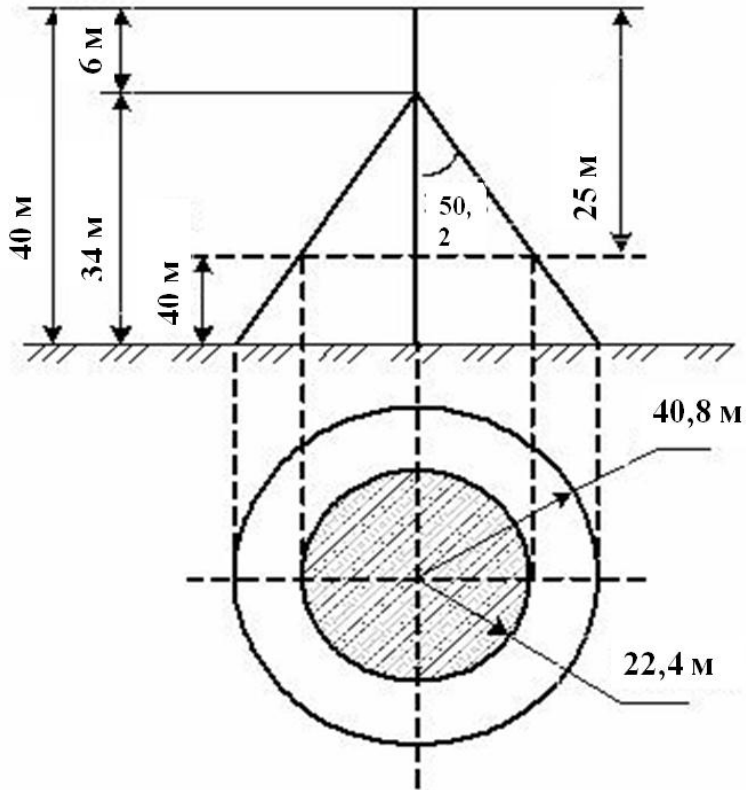


Рисунок 2 – Зона захисту одиночного стрижневого блискавковідводу з розмірами

## 9.6. Розрахунок зон захисту подвійного стрижневого блискавковідводу однакової висоти.

Зона захисту двох стрижневих блискавковідводів однакової висоти (рис. 3), що знаходяться на відстані один від одного  $L \leq (4 \div 6) h$ , розширюється в порівнянні з зонами одиночних стрижневих блискавковідводів.

Блискавковідвід вважається подвійним, якщо відстань між блискавковідводами  $L$  не перевищує граничної величини  $L_{max}$ .

Побудова зовнішніх областей зон подвійного блискавковідводу (напівконусів з габаритами  $h_o$ ,  $r_o$ ) проводиться за формулами, наведеними в табл. 3.

Розміри внутрішніх областей визначаються параметрами  $h_o$  і  $h_c$ , перший з яких задає максимальну висоту зони безпосередньо біля блискавковідводу, а другий - мінімальну висоту зони посередині між блискавковідводами.

При відстані між блискавковідводами  $L \leq L_c$  межа зони не має провисання ( $h_c = h_o$ ).

Для відстаней  $L_c \leq L \leq L_{max}$  висота  $h_c$  визначається за виразом:

$$h_c = \frac{L_{max} - L}{L_{max} - L_c} \cdot h_o \quad (10)$$

Значення  $L_{max}$  і  $L_c$  визначаються за формулами, наведеними в табл. 3.

Розміри горизонтальних перерізів зони обчислюються за такими формулами, спільними для всіх рівнів надійності захисту:

радіус зони  $r_x$  в горизонтальному перерізі на висоті  $h_x$ :

$$r_x = \frac{r_o \cdot (h_o - h_x)}{h_o} \quad (11)$$

довжина горизонтального перерізу  $L_x$  на висоті  $h_x \geq h_c$ :

$$L_x = \frac{L \cdot (h_o - h_x)}{2(h_o - h_c)}, \quad (12)$$

причому при  $h_x < h_c$   $L_x = 0,5L$ ;

напівширина горизонтального перерізу в центрі між блискавковідводами  $r_{cx}$  на висоті  $h_x < h_c$ :

$$r_{cx} = \frac{r_o \cdot (h_c - h_x)}{h_c}. \quad (13)$$

Таблиця 3 – Розрахункові формули для параметрів  $L_{max}$  і  $L_x$ .

$P_3$	$h$ , М	$L_{max}$ , М	$L_c$ , М
0,9	$\leq 30$	$5,75h$	$2,5h$
	$30 < h \leq 100$	$[5,75 - 3,57 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$	$2,5h$
	$100 < h \leq 150$	$5,5h$	$2,5h$
0,99	$\leq 30$	$4,75h$	$2,25h$
	$30 < h \leq 100$	$[4,75 - 3,57 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$	$[2,25 - 0,01007 \cdot (h-30)]h$
	$100 < h \leq 150$	$4,5h$	$1,5h$
0,999	$\leq 30$	$4,25h$	$2,25h$
	$30 < h \leq 100$	$[4,25 - 3,57 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$	$[2,25 - 0,01007(h-30)]h$
	$100 < h \leq 150$	$4h$	$1,5h$

### 9.7. Розрахунок зон захисту подвійного різновисокого стрижневого блискавковідводу

Зони захисту двох стрижневих блискавковідводів різної висоти представлені на рис. 4.

Межі зовнішніх областей зон захисту ( $h_{01}$ ,  $h_{02}$ ,  $r_{01}$ ,  $r_{02}$ ,  $r_{x1}$ ,  $r_{x2}$ ) визначаються як для зон одиночних стрижневих блискавковідводів висотою  $h_1$  і  $h_2$  відповідно за формулами табл.1.

Розміри внутрішньої області зони захисту визначаються за такими формулами:

$$r_c = \frac{r_{o1} + r_{o2}}{2}; \quad (14)$$

$$h_c = \frac{h_{c1} + h_{c2}}{2}; \quad (15)$$

$$r_{cx} = \frac{r_c \cdot (h_c - h_x)}{h_c} \quad (16)$$

де значення  $h_{c1}$  і  $h_{c2}$  розраховуються за формулами визначення  $h_c$  (9) для подвійних блискавковідводів висотою  $h_1$  і  $h_2$  відповідно.

Причому  $h_x$  не повинно бути вище  $h_{01}$  і  $h_{02}$ .

### **9.8. Визначення зон захисту багаторазового стрижневого блискавковідводу**

Зона захисту стрижневих блискавковідводів  $M_1 \div M_3$ , розміщених у вершинах трикутника (рис. 5), визначається [3,4,7] як зона захисту попарно взятих сусідніх стрижневих блискавковідводів.

Основною умовою захищеності об'єктів висотою  $h_x$ , розміщених всередині трикутника, є виконання (з деяким запасом) нерівності  $r_{cxi} \geq 0,5$  м для всіх попарно взятих блискавковідводів.

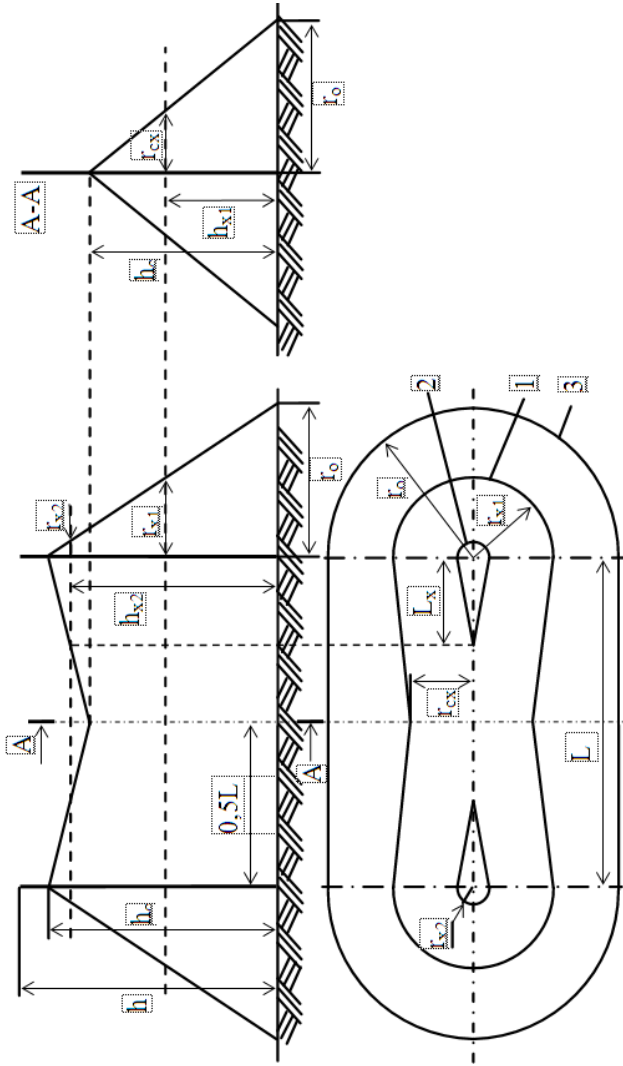


Рисунок 3 - Зони захисту подвійного стрижневого блискавководводу:  
 1 - границя зони захисту на рівні  $h_{x1}$ ; 2 - границя зони захисту на рівні  $h_{x2}$ ; 3 - границя зони захисту на рівні землі.

Разом з тим кількість стрижневих блискавковідводів може бути значно більше трьох, наприклад при захисті від прямих ударів блискавки електрообладнання та інших об'єктів, розміщених на території ВРП підстанції.

У цьому випадку після розстановки блискавковідводів вся територія ВРП по найкоротшій відстані між блискавковідводами розбивається на трикутники, в вершинах яких знаходяться блискавковідводи.

Потім для кожної пари блискавковідводів виконуються розрахунки зон захисту із заданою надійністю

Результати розрахунків порівнюються з умовою захищеності об'єктів висотою  $h_x$  ( $r_{cxi}$  повинна бути більше заданого значення).

За результатами порівняння проводиться коригування місць розташування блискавковідводів, їх висот, кількості.

Слід прагнути до можливо меншої висоти блискавковідводів, з тим, щоб зменшити число ударів блискавок в територію підстанції.

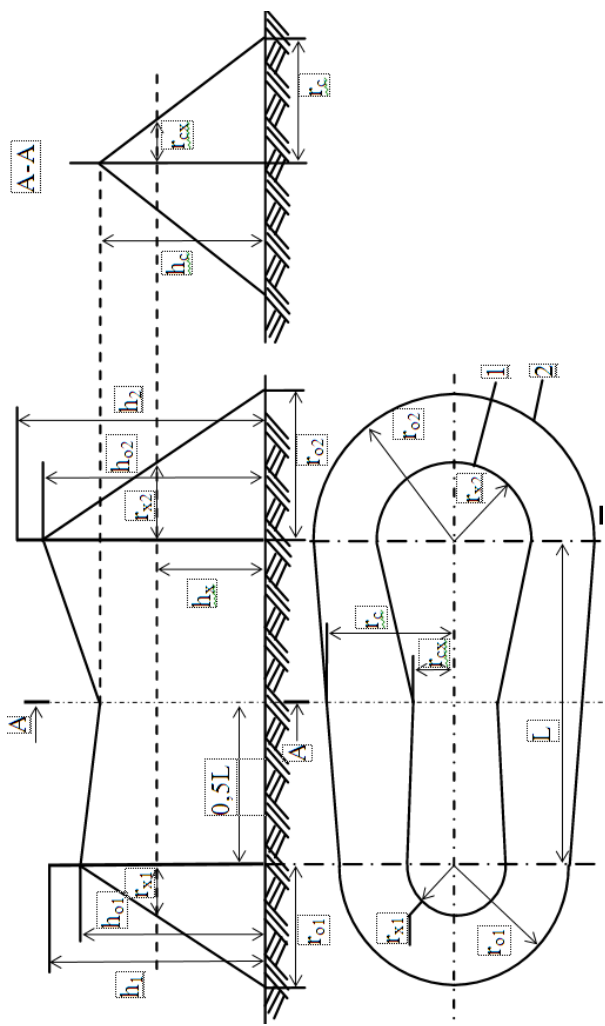


Рисунок 4 - Зони захисту подвійного різновисокого стрижневого блискавковідводу:  
 1 - границя зони захисту на висоті  $h_x$ ; 2 - границя зони захисту на рівні землі.

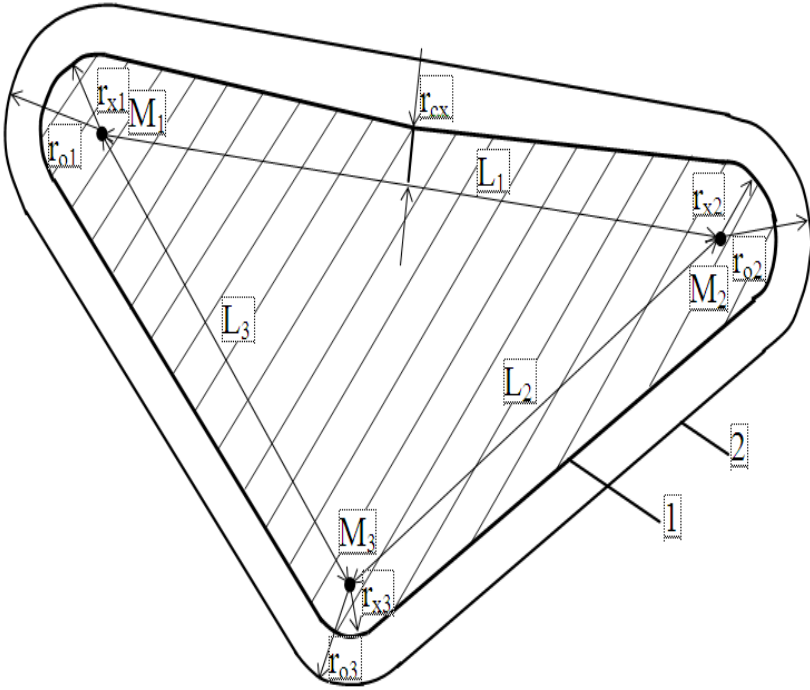


Рисунок 5 - Зони захисту багаторазового стрижневого блискавковідводу:

- 1 - границя зони захисту на висоті  $h_x$ ;
- 2 - границя зони захисту на рівні землі.

### 9.9. Розрахунок зон захисту одиночного тросового блискавковідводу

Зони захисту одиночного тросового блискавковідводу (рис. 6) обмежені симетричними двосхилими поверхнями, що утворюють в вертикальному перерізі рівнобедрений трикутник з вершиною на висоті  $h_o < h$  і основою на рівні землі  $2r_o$ ;  $h$  висота троса в середині прогону.



З урахуванням стріли провисання троса перерізом 35÷50 мм<sup>2</sup> при відомих висоті опор  $h_{on}$  і довжині прогону  $L$  висота троса  $h$  (в метрах) визначається так:

$$\text{при } L < 120 \text{ м} \quad h = h_{on} - 2;$$

$$\text{при } 120 < L < 150 \text{ м} \quad h = h_{on} - 3.$$

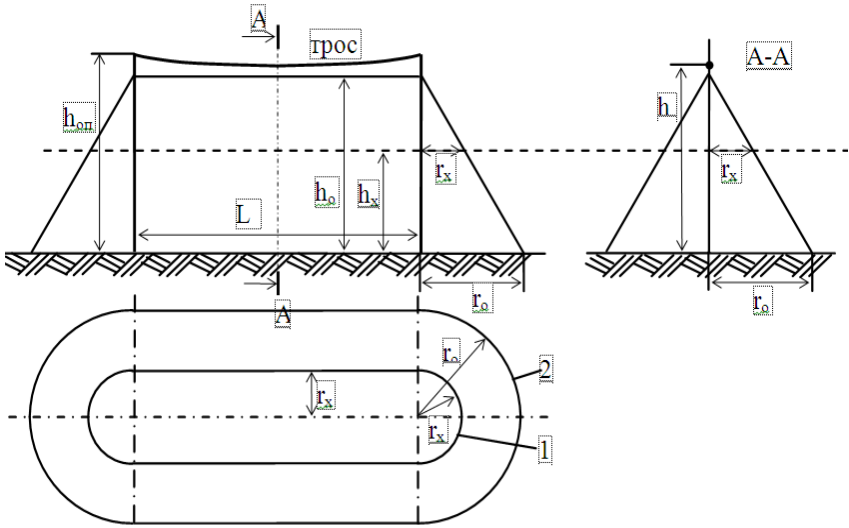


Рисунок 6 - Зони захисту одиночного тросового блискавковідводу:

1 - границя зони на висоті  $h_x$ ;

2 - границя зони на рівні землі.

При невеликих стрілах провисання  $h$  приймається рівною мінімальній висоті над рівнем землі.

Радіус зони захисту  $r_x$  на висоті  $h_x$  визначається за формулою:

$$r_x = \frac{r_o \cdot (h_o - h_x)}{h_o} \quad (17)$$

Значення параметрів  $h_o$  і  $r_o$  – за формулами, що наведені в табл. 4.

У разі великих провисань тросів рекомендується розраховувати надійність програмними методами, що забезпечується, тому що побудова зон захисту за мінімальною висотою троса в прогоні може привести до невиправданих витрат.

Таблиця 4 – Розрахункові формули для параметрів  $h_o$  і  $r_o$ .

$P_3$	$h, м$	$h_o, м$	$r_o, м$
0,9	$\leq 150$	$0,87h$	$1,5h$
0,99	$\leq 30$	$0,8h$	$0,95h$
	$30 < h \leq 100$	$0,8h$	$[0,95 - 7,14 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$
	$100 < h \leq 150$	$0,8h$	$[0,9 - 10^{-3}(h-100)]h$
0,999	$\leq 30$	$0,75h$	$0,7h$
	$30 < h \leq 100$	$[0,75 - 4,28 \cdot 10^{-4}(h-30)]$	$[0,7 - 1,43 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$
	$100 < h \leq 150$	$[0,72 \cdot 10^{-3}(h-100)]h$	$[0,6 - 10^{-3}(h-100)]h$

### 9.10. Розрахунок зон захисту подвійного тросового блискавковідводу

Блискавковідвід вважається подвійним, якщо відстань між тросами  $L$  не перевищує граничної величини  $L_{max}$ .

Зони захисту подвійного тросового блискавковідводу висотою  $h$  представлені на рис. 7.

Побудова зовнішніх областей зон здійснюється за формулами одиночного тросового блискавковідводу, табл. 5.

Розміри внутрішніх областей визначаються параметрами  $h_o$  і  $h_c$ , перший з яких задає максимальну висоту зони безпосередньо біля тросів, а другий - мінімальну висоту зони посередині між тросами.

При відстані між тросами  $L \leq L_c$  границя зони не має провису ( $h_c = h_o$ ).

Для відстаней  $L_c < L \leq L_{max}$  висота  $h_c$  визначається за виразом:

$$h_c = \frac{L_{max} - L}{L_{max} - L_c} \cdot h_o \quad (18)$$

Таблиця 5 – Розрахункові формули для параметрів  $L_{max}$  і  $L_c$ .

$P_3$	$h, \text{ м}$	$L_{max}, \text{ м}$	$L_c, \text{ м}$
0,9	$\leq 150$	$6h$	$3h$
0,99	$\leq 30$	$5h$	$2,5h$
	$30 < h \leq 100$	$5h$	$[2,5 - 7,14 \cdot 10^{-3}(h - 30)]h$
	$100 < h \leq 150$	$[5 - 5 \cdot 10^{-3}(h - 100)]h$	$[2 - 5 \cdot 10^{-3}(h - 100)]h$
0,999	$\leq 30$	$4,75h$	$2,25h$
	$30 < h \leq 100$	$[4,75 - 3,57 \cdot 10^{-3}(h - 30)]h$	$[2,25h - 3,57 \cdot 10^{-3}(h - 30)]h$
	$100 < h \leq 150$	$[4,5 - 5 \cdot 10^{-3}(h - 100)]h$	$[2 - 5 \cdot 10^{-3}(h - 100)]h$

Відстані  $L_{max}$  і  $L_o$  обчислюються за формулами, наведеним в табл. 5.

Напівширина горизонтального перерізу в центрі між блискавковідводами  $r_{cx}$  на висоті  $h_x < h_c$  :

$$r_{cx} = \frac{r_o \cdot (h_c - h_x)}{h_c} \quad (19)$$

Для розширення області, що захищається на зони подвійного тросового блискавковідводу може бути накладені зони захисту опор, що несуть троси, які будуються як зони подвійного стрижневого блискавковідводу, якщо відстань  $L$  між опорами менше  $L_{max}$ , обчисленого за формулами (табл. 5).

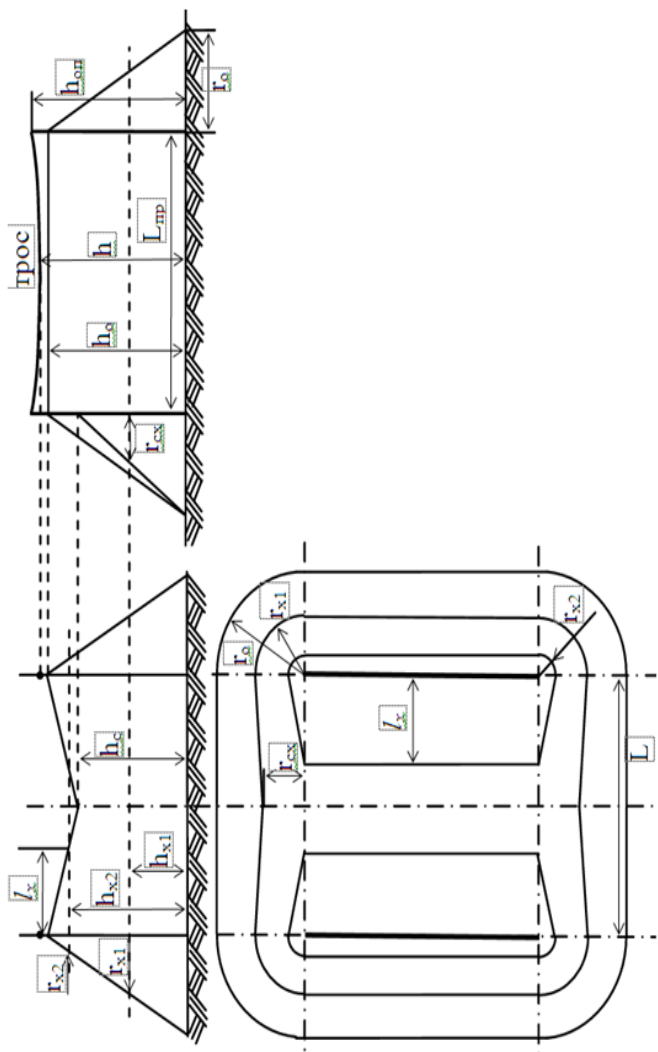


Рисунок 7 - Зони захисту подвійного тросового блискавковідводу:  
 1 - границі зони захисту на висоті  $h_{x1}$ ; 2 - границі зони захисту на висоті  $h_{x2}$ ;  
 3 - границі зони захисту на рівні землі.

### 9.11. Захист об'єктів замкнутим тросовим блискавко-відводом

Об'єкти висотою  $h_x < 30$  м, розміщені на прямокутній поверхні площею  $S$ , можуть бути захищені з необхідною надійністю замкнутим у вигляді прямокутника тросом, як показано на рис. 8.

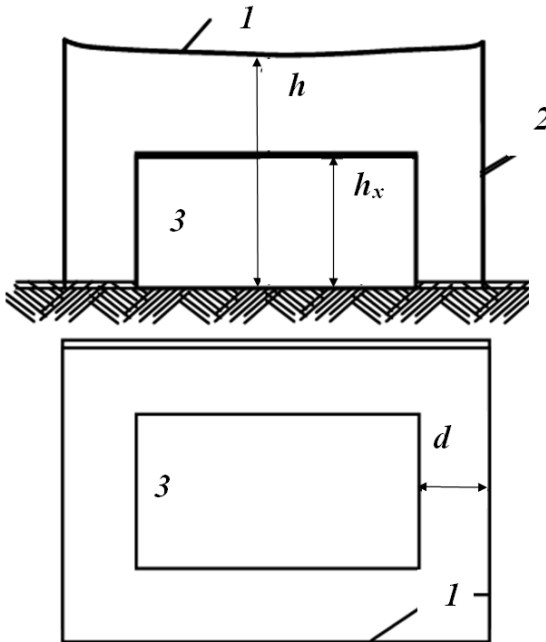


Рисунок 8 - Зона захисту замкнутого тросового блискавко-відводу: 1 - троси; 2 - опори; 3 - об'єкт.

Мінімальна висота від тросу до поверхні землі з урахуванням можливих провисань в літній сезон визначається як:

$$h = K_1 + K_2 \cdot h_x, \quad (20)$$

де  $h_x$  - максимальна висота об'єктів захисту.

Значення коефіцієнтів  $K_1$  і  $K_2$  в залежності від необхідної надійності захисту і значення мінімальної відстані по горизон-

нталі між тросовим блискавковідводом і об'єктом  $d$  розраховуються за такими формулами:

Для надійності захисту  $P_3=0,99$ .

$$K_1 = -0,14 + 0,252(d - 5) + [0,127 + 6,4 \cdot 10^{-4}(d - 5)] \sqrt{S};$$
$$K_2 = 1,05 - 9,08 \cdot 10^{-3}(d - 5) + [-3,44 \cdot 10^{-3} + 5,87 \cdot 10^{-5}(d - 5)] \sqrt{S}.$$

Для надійності захисту  $P_3=0,999$

$$K_1 = -0,08 + 0,324(d - 5) + [0,161 + 2,41 \cdot 10^{-4}(d - 5)] \sqrt{S};$$
$$K_2 = 1,1 - 0,0115(d - 5) + [-4,24 \cdot 10^{-3} + 1,25 \cdot 10^{-4}(d - 5)] \sqrt{S}.$$

Формули справедливі за  $d > 5$  м.

Менші значення  $d$  недоцільні через високу ймовірність зворотних перекриттів блискавки з тросу на об'єкт, що захищається.

З економічних міркувань замкнуті тросові блискавковідводи не рекомендуються, якщо необхідна надійність захисту менше 0,99.

## 9.12. Захист об'єктів блискавкоприймальною сіткою.

Блискавкоприймальна сітка - це провідник, покладений зверху на покрівлю з обраним в залежності від класу блискавкозахисту будівлі кроком осередку. При цьому всі металеві елементи на даху (повітрязабірники, труби, зенітні ліхтарі, вентиляційні шахти і т. п.) обов'язково повинні бути з'єднані з сіткою. Інакше для них необхідно змонтувати додаткові блискавкоприймачі.

Вертикальні заземлюючі електроди (1) при цьому типі розміщення повинні з'єднуватися з нижніми кінцями струмовідводів (2) з використанням контрольних з'єднань (3). Ко-

жен струмовідвід закінчується вертикальним заземлювачем (4). Заземлюючі електроди повинні бути прокладені на глибині по верхньому краю не менше 0,5 м і, по можливості, розподілятися рівномірно, щоб звести до мінімуму вплив електричної взаємодії в землі.

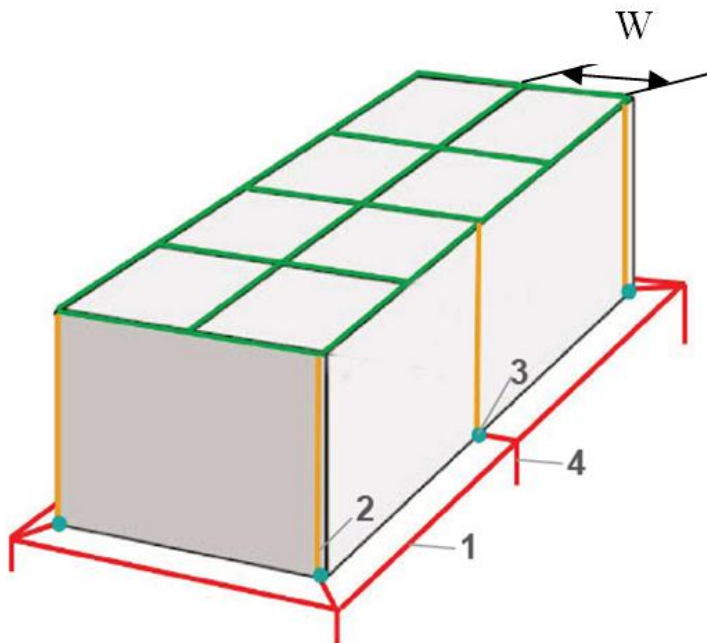


Рисунок 9 - Зона захисту сітчастого блискавковідводу:

1 - вертикальні заземлюючі електроди; 2 - нижні кінці струмовідводів; 3 – контрольні з'єднання; 4 - вертикальні заземлювачі; W - розмір комірки сітки.

Метод блискавкоприймальної сітки використовують для захисту рівних поверхонь (наприклад, для будинків з пласкою покрівлею).

Відповідно до ДСТУ EN 62305-3:2012, блискавкоприймальна сітка, розміщена на рівних поверхнях, захищає всю поверхню, якщо виконуються умови:

а) провідники сітки прокладені по:

– краю даху та виступах;

– коньку даху, якщо ухил перевищує 10%;

– боковим поверхням будівлі висотою понад 60 м на рівні вище 80% її висоти;

б) розміри комірки сітки не перевищують нормативні значення з Таблиці 6 ДСТУ EN 62305-3:2012;

Таблиця 6 - Розмір комірки сітки W в залежності від класу LPS згідно ДСТУ EN 62305-3:2012.

Клас LPS	Розмір комірки сітки W
I	5x5
II	10x10
III	15x15
IV	20x20

в) сітка повинна бути виконана так, щоб струм блискавки мав завжди принаймні два різних шляхи до заземлювача;

г) жодні металеві частини покрівлі не повинні виступати за зовнішні контури сітки (якщо такі елементи є, їх потрібно захищати окремо);

д) провідники сітки повинні прокладатись найкоротшими прямими шляхами.

Всі елементи та конструкції, які виступають за межі сітки (наприклад, вентиляційні канали, дахове вентиляційне обладнання, антени, труби) повинні додатково захищатись вертикальними блискавкоприймачами методом захисного кута чи сфери).



### 9.13. Приклад розрахунку блискавкозахисту головної знижувальної підстанції (ГЗП) 35/10 кВ.

Захист обладнання підстанцій від прямих ударів блискавки забезпечується системою стрижневих і тросових блискавководів.

Захист підстанцій (ПС) від хвиль грозових перенапруг, що набігають заснований на виборі відповідних захисних апаратів (ОПН, розрядників), числа і місця їх установки на ПС з тим, щоб забезпечити таке зниження впливу хвиль грозових перенапруг за амплітудою і крутизою, за якого на протязі нормованого строку безаварійної експлуатації  $T_{н.е.}$  не будуть перевищені допустимі значення перенапруг для найбільш відповідального і цінного обладнання (трансформаторів, автотрансформаторів, шунтуючих реакторів і т. д.).

На рис. 11 показана компоновка ГЗП 35/10 кВ, яку необхідно захистити від прямих ударів блискавки.

**Головною знижувальною підстанцією (ГЗП)** називається підстанція, яка отримує живлення безпосередньо від районної енергосистеми і розподіляє електроенергію при більш низькій напрузі по всьому підприємству на напругу 35 ... 220 кВ.

Вихідні дані для розрахунку:

- $A$  – ширина ГЗП, м;
- $B$  – довжина ГЗП, м;
- $h_x$  - висота об'єкту, що захищається, м;
- $n$  – середньорічне число ударів блискавки в  $1 \text{ км}^2$

земної поверхні в місці знаходження об'єкту, в залежності від середньорічної тривалості гроз в годинах.

Для захисту ГЗП від прямих ударів блискавки застосовуються 4 блискавковідводи, які встановлюються кожен окремо, при цьому повинні дотримуватися наступні умови:

1. Якщо не можуть бути виконані умови установки блискавковідводу на конструкціях відкритого розподільного пристрою (ВРП).

2. Відстань по землі  $l_3$  між відокремленим заземлювачем блискавковідводу і заземлюючим контуром ВРП повинна бути такою, щоб уникати перекриття по землі між заземлювачами з вірогідністю не більше 0,1.

При цьому повинна виконуватись умова [4]:

$$l_3 \geq 0,2R_f \text{ і } l_3 \geq 3,$$

де  $R_f$  - опір заземлення опори.

3. Відстань по повітрю  $l_{II}$  від блискавковідводу, що стоїть окремо з відокремленим до струмопровідних частин заземлених конструкцій і обладнання ВРП повинна бути такою, щоб уникати перекриття по повітрю з вірогідністю не більше 0,1. При цьому повинна виконуватись умова [4]:

$$l_{II} \geq (0,12R_{II} + H_C) \text{ і } l_{II} \geq 5.$$

4. Опір заземлювача повинен бути не більше 80 Ом.

### **Послідовність розрахунку.**

1. Визначається очікувана кількість уражень блискавкою ГЗП на рік за (8):

$$N = \left[ (B + 6h_x)(A + 6h_x) - 7,7 \cdot \pi \cdot h_x^2 \right] \cdot n \cdot 10^{-6},$$

де  $A$  - ширина ГЗП, м;

$B$  - довжина ГЗП, м;

$h_x$  – висота об'єкту, що захищається, м;

$n$  – середньорічне число ударів блискавок в  $1 \text{ км}^2$  земної поверхні в місці знаходження об'єкту, в залежності від середньорічної тривалості гроз в годинах.

Для знаходження  $n$  необхідно визначити число грозових годин на рік за табл. 7 або по карті грозової діяльності в ПУЕ. Для Харківської області середнє число грозових годин на рік

становить від 60 до 80, тоді  $n=5,5 \frac{1}{\text{км}^2 \cdot \text{рік}}$ .

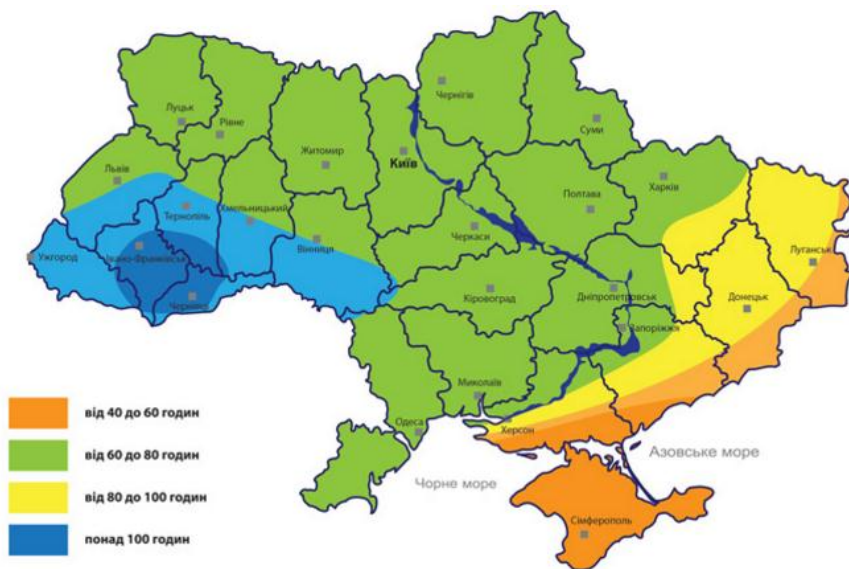


Рисунок 10 – Карта середньої тривалості гроз на рік в годинах для території України.

Геометричні розміри РТП  $A=30 \text{ м}$ ,  $B=40 \text{ м}$ , а висота об'єктів на території РТП, що захищаються, приймається рівною висоті порталу  $h_x=7,85 \text{ м}$ .

$$N = [(30 + 6 \cdot 7,85)(40 + 6 \cdot 7,85) - 7,7 \cdot 7,85^2] \cdot 5,5 \cdot 10^{-6} = 0,0343$$

Таблиця 7 – Середньорічне число ударів блискавки в 1 км<sup>2</sup> земної поверхні.

Середньорічна тривалість гроз, години	Питома щільність ударів блискавки в землю $n$ , $\frac{1}{\text{км}^2 \cdot \text{рік}}$
10 - 20	1
20 - 40	2
40-60	4
60-80	5,5
80-100	7
більше 100	8,5

1. За ступенем надійності захисту розрізняють зони А і Б. Зона захисту типу А має ступінь надійності захисту 99,5% і вище, а типу Б – до 95%.

Для будинків і споруд з приміщеннями, що вимагають улаштування блискавкозахисту І і ІІ або І і ІІІ категорій, блискавкозахист виконується за І категорією. Захист від прямих ударів блискавки повинен виконуватися стрижневими або тросовими блискавковідводами, що стоять окремо (це включає можливість термічного впливу на об'єкт).

2. Зона захисту - це простір, імовірність ураження об'єктів у межах якого не перевищує 0,05 (або 1 раз за 200 років). Зона захисту визначається відношенням  $L/h$  ( $L$ - відстань ряду блискавки;  $h$  - висота блискавковідводу). У деяких випадках для особливо важливих об'єктів зону захисту розраховують за умови імовірності прориву не більше за 0,005.

3. За цією оцінкою розрізняють зону захисту типу А, яка має ступінь надійності 99,5% й вище і зону захисту типу Б –

95% й вище. Існує два методи розрахунку зон захисту, які мало відрізняються за кінцевим результатом.

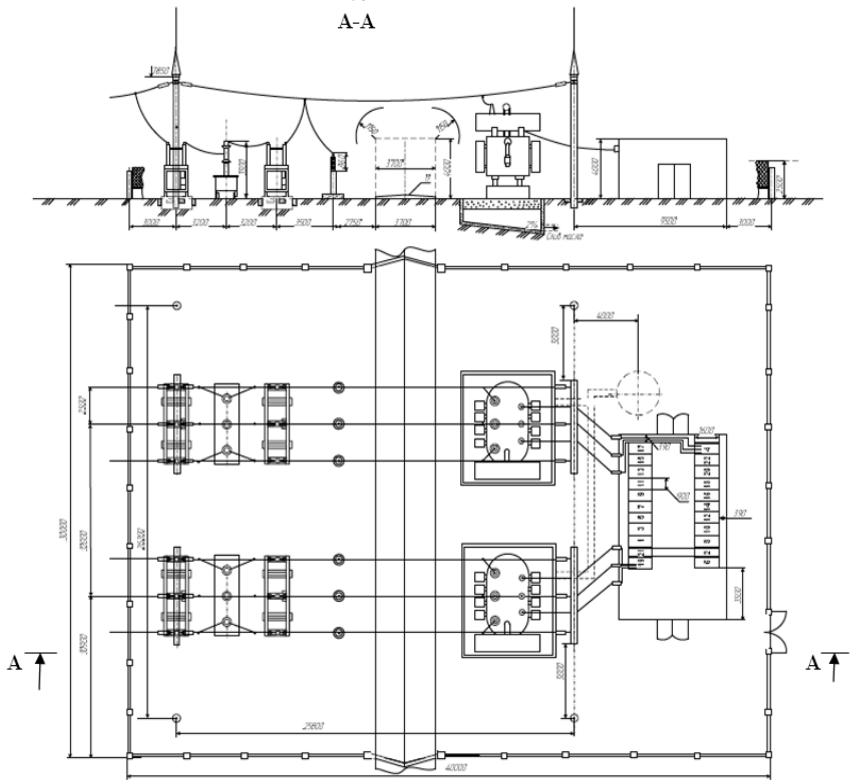


Рисунок 11 – План і загальний вигляд ГЗП 35/10 кВ.

Дослідження зони захисту, проведене на фізичних моделях показало, що геометрична форма захисної зони стрижневого блискавковідводу описується гіперболічним законом, але для практичного застосування гіпербола апроксимується ламаною лінією.

Приймається тип зони захисту Б, так як 0,0343 більше 0,005.

4. Визначається висота блискавковідводу з умови  $D < 8(h - h_x) \cdot p$ , за якої рівень  $h_x$  всередині гострокутного трикутника або прямокутника, утвореного найближчими трьома або чотирма стрижневими блискавковідводами, буде захищений, якщо діаметр  $D$  кола, що проходить через вершини трикутника, або діагональ  $D$  прямокутника задовольняють умові:

$$D < 8(h - h_x) \cdot p,$$

де коефіцієнт  $p=1$  при  $h < 30$  м.

При цьому межі верхньої частини зон захисту визначаються для кожної пари блискавковідводів.

Для прикладу ГЗП діагональ  $D$  прямокутника визначається за виразом:

$$D = \sqrt{L_1^2 + L_2^2},$$

де  $L_1, L_2$  - відстань між блискавковідводами по ширині і довжині ГЗП.

$$D = \sqrt{26,2^2 + 25,8^2} = 36,77 \text{ м},$$

$$36,77 < 8(h - 7,85) = 8h - 62,8.$$

З цього виразу знаходиться  $h > 12,44$  м, тому до встановлення приймаються блискавковідводи висотою  $h > 12,5$  м.

5. Зона захисту багаторазових стрижневих блискавковідводів визначається як зона захисту попарно взятих сусідніх стрижневих блискавковідводів висотою  $h \leq 150$  м.

Зона захисту подвійного стрижневого блискавковідводу показана на рис. 3.

Торцеві області зони захисту визначається як зона одиночних стрижневих блискавковідводів, габаритні розміри

яких  $h_0$ ,  $r_0$ ,  $r_{x1}$  визначаються за формулами для зони захисту типу Б.

Вершина конусу зони захисту:

$$h_0 = 0,92 \cdot h = 0,92 \cdot 12,5 = 11,5 \text{ м.}$$

Радіус основи конусу на рівні землі:

$$r_0 = 1,5 \cdot h = 1,5 \cdot 12,5 = 18,75 \text{ м.}$$

Радіус зони захисту на висоті  $h_{x1}$ :

$$r_{x1} = 1,5 \cdot (h - h_x / 0,92) = 1,5 \cdot (12,5 - 7,85 / 0,92) = 5,95 \text{ м}$$

Висота зони захисту посередині між блискавковідводами:

$$h_{c1} = h_0 - 0,14 \cdot (L_1 - h) = 11,5 - 0,14 \cdot (26,2 - 12,5) = 9,58 \text{ м,}$$

$$h_{c2} = h_0 - 0,14 \cdot (L_2 - h) = 11,5 - 0,14 \cdot (25,8 - 12,5) = 9,64 \text{ м.}$$

Ширина горизонтального перерізу сумісної зони захисту на висоті  $h_x$  від рівня землі:

$$r_{cx1} = r_0 \cdot \frac{(h_{c1} - h_x)}{h_{c1}} = 18,75 \cdot \frac{(9,58 - 7,85)}{9,58} = 3,39 \text{ м,}$$

$$r_{c2} = r_0 \cdot \frac{(h_{c2} - h_x)}{h_{c2}} = 18,75 \cdot \frac{(9,64 - 7,85)}{9,64} = 3,48 \text{ м.}$$

Ширина сумісної зони захисту:

$$r_c = r_0 = 18,75 \text{ м.}$$

6. Будується зона захисту стрижневих блискавковідводів.

Якщо зона захисту, побудована на висоті  $h_{x1}$ , не захищає якісь об'єкти, то здійснюється розрахунок параметрів зони захисту для висоти цих об'єктів. В даному прикладі такими

об'єктами є споруда закритого розподільного пристрою(ЗРП) і паркан з  $h_{x2}=4$  м і  $h_{x3}=2,5$  м відповідно.

7. Розрахунок параметрів зони захисту для споруди ЗРП. Радіус зони захисту на висоті  $h_{x2}$ :

$$r_{cx2} = 1,5 \cdot (h - h_{x2} / 0,92) = 1,5 \cdot (12,5 - 4 / 0,92) = 12,23 \text{ м.}$$

Ширина горизонтального перерізу сумісної зони захисту на висоті  $h_x$  від рівня землі:

$$r_{cx12} = r_0 \cdot \frac{(h_{c1} - h_{x2})}{h_{c1}} = 18,75 \cdot \frac{(9,58 - 4)}{9,58} = 10,92 \text{ м,}$$

$$r_{cx22} = r_0 \cdot \frac{(h_{c2} - h_{x2})}{h_{c2}} = 18,75 \cdot \frac{(9,64 - 4)}{9,64} = 10,97 \text{ м.}$$

8. Будується зона захисту стрижневих блискавковідводів.

9. Розрахунок параметрів зони захисту для висоти паркану.

Радіус зони захисту на висоті  $h_{x3}$ :

$$r_{x3} = 1,5 \cdot (h - h_{x3} / 0,92) = 1,5 \cdot (12,5 - 2,5 / 0,92) = 14,67 \text{ м.}$$

Ширина горизонтального перерізу сумісної зони захисту на висоті  $h_x$  від рівня землі:

$$r_{cx13} = r_0 \cdot \frac{(h_{c1} - h_{x3})}{h_{c1}} = 18,75 \cdot \frac{(9,58 - 2,5)}{9,58} = 13,86 \text{ м,}$$

$$r_{cx23} = r_0 \cdot \frac{(h_{c2} - h_{x3})}{h_{c2}} = 18,75 \cdot \frac{(9,64 - 2,5)}{9,64} = 13,89 \text{ м.}$$

10. Будується зона захисту стрижневих блискавковідводів.



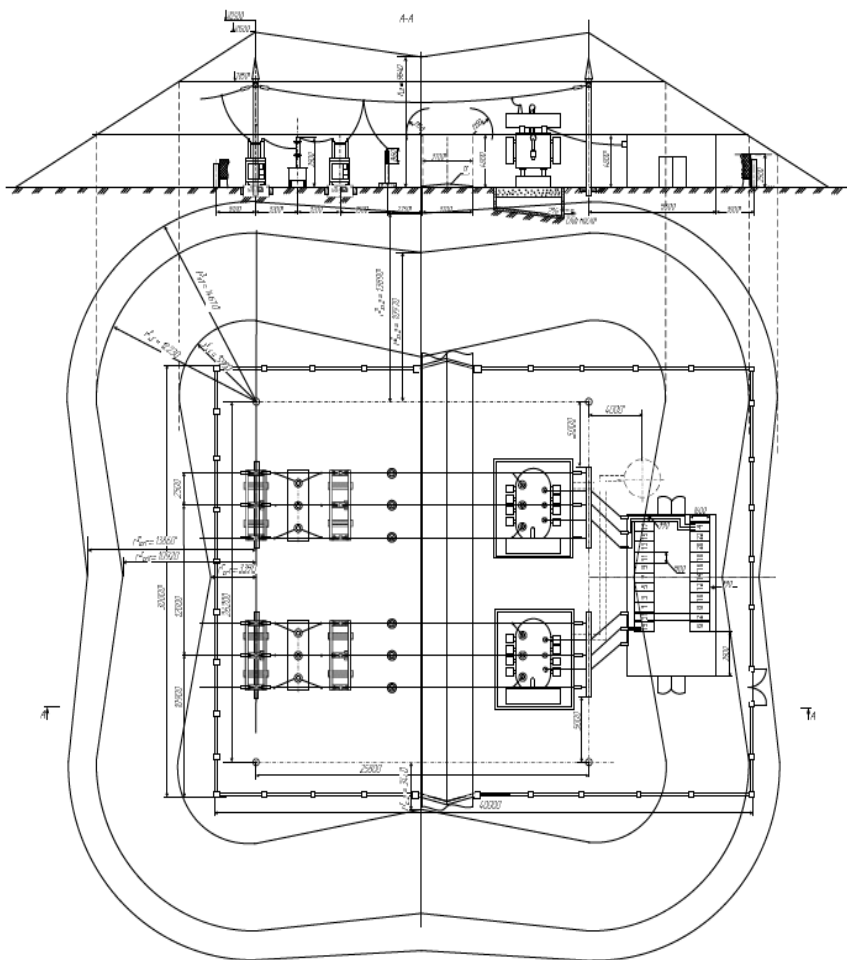


Рисунок 12 – Зони захисту стрижневих блискавковідводів для ГЗП 35/10 кВ.

## 9.14. Завдання для розрахунку зон захисту різних видів блискавкозахисту

Завдання 1: За вихідними даними наведеними у таблицях 8-11, обчислити розміри і побудувати зону захисту блискавковідводів. За результатами розрахунків зробити висновки про надійність захисту даними блискавковідводами будівлі зазначених розмірів.

Завдання 2: За вихідними розмірами будівлі визначити необхідні параметри блискавковідводів, що забезпечують захист будівлі від удару блискавки. Розрахункове значення розмірів блискавковідводів порівняти з заданими і зробити висновки про надійність захисту будівлі блискавковідводами.

Таблиця 8 - Завдання для розрахунку зони захисту одиночного стрижневого блискавковідводу

Вариант	Розміри, м				Вариант	Розміри, м			
	$H$	$s$	$l$	$H$		$H$	$s$	$l$	$H$
<b>1</b>	20	28	80	50	<b>11</b>	25	33	85	55
<b>2</b>	50	30	70	50	<b>12</b>	55	35	75	55
<b>3</b>	25	15	35	40	<b>13</b>	30	20	40	45
<b>4</b>	30	20	64	55	<b>14</b>	35	25	69	60
<b>5</b>	55	15	55	80	<b>15</b>	60	20	60	85
<b>6</b>	28	15	22	40	<b>16</b>	33	20	27	45
<b>7</b>	18	44	80	50	<b>17</b>	23	49	85	55
<b>8</b>	60	17	50	100	<b>18</b>	65	22	55	105

Продовження таблиці 8									
<b>9</b>	25	15	35	40	<b>19</b>	30	20	40	45
<b>10</b>	40	20	45	60	<b>20</b>	45	25	50	65

$H$  - висота будівлі;  $h$  - висота блискавковідводу;  $s$  - ширина будівлі;  $l$  - довжина будівлі.

Таблиця 9 - Завдання для розрахунку зони захисту подвійного стрижневого блискавковідводу однакової висоти.

Варі- ант	Розміри, м					Варі- ант	Розміри, м				
	$H$	$s$	$l$	$h$	$L$		$H$	$s$	$l$	$h$	$L$
<b>1</b>	20	50	90	50	10	<b>11</b>	25	55	95	55	15
<b>2</b>	60	15	70	80	20	<b>12</b>	65	20	75	85	25
<b>3</b>	30	20	50	40	10	<b>13</b>	35	25	55	45	10
<b>4</b>	30	35	70	50	20	<b>14</b>	35	30	75	55	25
<b>5</b>	70	28	80	80	30	<b>15</b>	75	33	85	85	35
<b>6</b>	28	20	60	40	10	<b>16</b>	33	25	65	45	15
<b>7</b>	40	12	45	50	15	<b>17</b>	45	17	50	55	15
<b>8</b>	62	20	50	80	25	<b>18</b>	67	25	55	85	25
<b>9</b>	28	15	50	40	15	<b>19</b>	33	20	55	45	20
<b>10</b>	45	12	90	60	30	<b>20</b>	50	17	95	65	35

$H$  - висота будівлі;  $h$  - висота блискавковідводу;  $s$  - ширина будівлі;  $l$  - довжина будівлі;  $L$  - відстань між опорами блискавковідводів.

Таблиця 10 - Завдання для розрахунку зони захисту подвійного стрижневого блискавковідводу різної висоти.

Варі - ант	Розміри, м						Варі- ант	Розміри, м					
	$H$	$s$	$l$	$h_1$	$h_2$	$L$		$H$	$s$	$l$	$h_1$	$h_2$	$L$
<b>1</b>	20	50	90	50	60	10	<b>11</b>	25	55	95	55	65	15
<b>2</b>	60	15	70	80	90	20	<b>12</b>	65	20	75	85	95	25
<b>3</b>	30	20	50	40	50	10	<b>13</b>	35	25	55	45	55	10
<b>4</b>	30	35	70	50	60	20	<b>14</b>	35	30	75	55	65	25
<b>5</b>	70	28	80	80	90	30	<b>15</b>	75	33	85	85	95	35
<b>6</b>	28	20	60	40	50	10	<b>16</b>	33	25	65	45	55	15
<b>7</b>	40	12	45	50	60	15	<b>17</b>	45	17	50	55	65	15
<b>8</b>	62	20	50	80	90	25	<b>18</b>	67	25	55	85	95	25
<b>9</b>	28	15	50	40	50	15	<b>19</b>	33	20	55	45	55	20
<b>10</b>	45	12	90	60	70	30	<b>20</b>	50	17	95	65	75	35

$H$  - висота будівлі;  $h_1$  і  $h_2$  - висота блискавковідводів;  $s$  - ширина будівлі;  $l$  - довжина будівлі;  $L$  - відстань між опорами блискавковідводів.

Таблиця 11 - Завдання для розрахунку зони захисту одиначного тросового блискавковідводу.

Варіант	Розміри, м					Варіант	Розміри, м				
	$H$	$s$	$l$	$h_{on}$	$L$		$H$	$s$	$l$	$h_{on}$	$L$
<b>1</b>	30	20	80	52	15	<b>11</b>	35	25	85	57	20
<b>2</b>	60	12	60	82	25	<b>12</b>	65	12	65	87	30

Продовження таблиці 11.											
<b>3</b>	20	15	50	42	15	<b>13</b>	25	20	55	47	20
<b>4</b>	35	25	75	52	18	<b>14</b>	40	30	80	57	23
<b>5</b>	50	12	60	82	22	<b>15</b>	55	17	65	87	27
<b>6</b>	30	15	45	42	10	<b>16</b>	35	20	50	47	15
<b>7</b>	30	12	60	52	15	<b>17</b>	35	17	65	57	20
<b>8</b>	60	15	90	82	28	<b>18</b>	65	20	90	87	33
<b>9</b>	25	15	55	42	12	<b>19</b>	30	20	55	47	17
<b>10</b>	50	12	80	62	22	<b>20</b>	55	17	85	67	27

$H$  - висота будівлі;  $h_{on}$  - висота опор тросу;  $s$  - ширина будівлі;  $l$  - довжина будівлі;  $L$  - відстань між опорами.

Таблиця 12 - Тип зони захисту в залежності від середньорічної тривалості гроз

№ з п	Будинки і споруди	Місцезнаходження	Тип зони при використанні стрижневих і тросових блискавководів	Категорія блискавкозахисту
1	2	3	4	5
1	Будинки і споруди або їх частини, приміщення яких згідно з ПУЕ відносяться до зон класів В I і В II	На всій території СНГ	Зона А	I

Продовження таблиці 12.				
1	2	3	4	5
2	Будинки і споруди або їх частини, приміщення яких відповідно до ПУЕ відносяться до зон класів В І а, В І б, В ІІ а	У місцевостях із середньою тривалістю гроз 10 год на рік і більше	При очікуваній кількості уражень блискавкою в рік будівлі або споруди $N > 1$ - зона А; При $N \leq 1$ - зона Б.	ІІ
3	Зовнішні установки, що відповідно до ПУЕ відносяться до зон класу В І г	На всій території СНД	Зона Б	ІІ
4	Будинки і споруди або їх частини, приміщення яких відповідно до ПУЕ відносяться до зон класів ІІ І, ІІ ІІ, ІІ ІІ а	У місцевостях із середньою тривалістю гроз 20 год на рік і більше	Для будівель і споруд І і ІІ ступенів вогнестійкості при $0,1 < N \leq 2$ і для ІІІ - V ступенів вогнестійкості при $0,02 < N \leq 2$ зона Б, при $N > 2$ - зона А	ІІІ
5	Розташування в сільській місцевості невеликих будівель ІІІ - V ступенів вогнестійкості, приміщення яких	У місцевостях із середньою тривалістю гроз 20 год на	-	ІІІ

Продовження таблиці 12.				
1	2	3	4	5
	згідно з ПУЕ відносяться до зон класів П I, П II, П II а	рік і більше		
6	Зовнішні установки і відкриті склади, що створюють згідно з ПУЕ зону класу П III	У місцевостях із середньою тривалістю гроз 20 год на рік і більше	При $0,1 < N \leq 2$ – зона Б, при $N > 2$ – зона А	III
7	Будинки і споруди III, III а, III б, IV, V ступенів вогнестійкості, в яких відсутні приміщення, що відносяться за ПУЕ до зон вибухо- і пожежо-небезпечних класів	У місцевостях із середньою тривалістю гроз 20 год на рік і більше	При $0,1 < N \leq 2$ - зона Б, при $N > 2$ - зона А	7
8	Будинки і споруди з легких металевих конструкцій з горючим утеплювачем (IV ступеню вогнестійкості), в яких відсутні приміщення, що відносяться за	У місцевостях із середньою тривалістю гроз 10 год на рік і більше	При $0,02 < N \leq 2$ - зона Б, при $N > 2$ – зона А	8

Продовження таблиці 12.				
1	2	3	4	5
	ПУЕ до зон вибухо- і пожежо- небезпечних класів			
9	Невеликі будівлі III - V ступенів вогнестійкості, розташовані в сільській місцевості, в яких відсутні приміщення, що відносяться за ПУЕ до зон вибухо- і пожежонебезпечних класів .	У місцевостях з середньою тривалістю гроз 10 год на рік і більше	При $0,02 < N \leq 2$ - зона Б, при $N > 2$ – зона А	8
10	Будинки обчислювальних центрів, в тому числі розташованих в міській забудові	У місцевостях з середньою тривалістю гроз 20 год на рік і більше	Зона Б	II
11	Тваринницькі та птахівницькі будівлі і споруди III V ступенів вогнестійкості: для великої рогатої худоби і свиней на 100 голів і більше,	У місцевостях з середньою тривалістю гроз 40 год на рік і більше	Зона Б	III



Продовження таблиці 12.				
1	2	3	4	5
	для овець на 500 голів і більше, для птиці на 1000 голів і більше для коней на 40 голів і більше			
12	Димові і інші труби підприємств і котельних, башти та вишки всіх призначень висотою 15 м і більше	У місцевостях із середньою тривалістю гроз 10 год на рік і більше	-	III
13	Житлові і громадські будівлі, висота яких більше ніж на 25 м перевищує середню висоту навколишніх будівель в радіусі 400 м, а також окремо розташована будівля висотою більше 30 м, віддалення від інших будівель більш ніж на 400 м	У місцевостях з середньою тривалістю гроз 20 год на рік і більше	Зона Б	III
14	Окремо розташовані житлові і громадські будівлі в сільській місцевості висотою понад 30 м	У місцевостях з середньою тривалістю гроз 20 год на рік і більше	Зона Б	III

Продовження таблиці 12.				
1	2	3	4	5
15	Громадські будівлі III V ступенів вогнестійкості наступного призначення: дитячі дошкільні установи, школи та школи інтернати, стаціонари лікувальних установ, спальні корпуси та столові установ охорони здоров'я і відпочинку, культурно освітні та видовищні установи, адміністративні будівлі, вокзали, готелі, мотелі і кемпінги	У місцевостях із середньою тривалістю гроз 20 год на рік і більше	Зона Б	III
16	Відкриті видовищні установи (зали для глядачів відкритих кінотеатрів, трибуни відкритих стадіонів і т.п.)	У місцевостях із середньою тривалістю гроз 20 год на рік і більше	Зона Б	III
17	Будинки й споруди, які є пам'ятками історії, архітектури та культури (скульптури, обеліски і т.п.)	У місцевостях із середньою тривалістю гроз 20 год на рік і більше	Зона Б	III

## Контрольні питання

1. Яким чином здійснити захист ЗРП від прямих ударів блискавки?

2. Чому гірлянди ізоляторів на порталах ВРП 35 кВ з тросовими або стрижневими блискавковідводи повинні бути виконані на клас 110 кВ?

3. Чому не слід розташовувати блискавковідводи на трансформаторних порталах?

4. Чому введені обмеження по відстані між блискавковідводом і деякими об'єктами (трансформатори, відкриті шинопроводи тощо)?

5. Чому встановлені допустимі відстані по повітрю і землі для блискавковідводу з відособленим заземлювачем?

6. Яким чином повинні бути виконані вимоги при приєднанні тросів, які захищають підходи ПЛ 35 кВ, до лінійних порталів ВРП?

7. Що таке зона захисту блискавковідводу; яку вона може мати ступінь надійності?

8. Назвати умову, щоб два поруч розташованих блискавковідводи вважалися подвійними?

9. Де слід розташовувати блискавковідводи для захисту електричних підстанцій?

10. Назвати умови при установці блискавковідводів на трансформаторних порталах?

11. Чому для трансформаторів з обмотками класу 6÷10 кВ точка приєднання трансформатора до заземлювального пристрою підстанції повинна бути віддалена від місця приєднання до нього блискавковідводу не менше ніж на 15 м?

12. Яке значення мінімальної відстані між блискавковідводом, що окремо стоїть з відособленим заземлювачем і

струмопровідними частинами, будівлями та іншими конструкціями?

13. Що таке температурна інверсія в атмосфері, які її параметри і види?

14. Чим забезпечується надійність грозозахисту ПЛ?

## 10. Загальні принципи грозозахисту підстанцій

Рівень ізоляції обладнання підстанцій та розподільних пристроїв з економічних міркувань нижче рівня ізоляції ліній. На ізоляцію обладнання може впливати або повна імпульсна хвиля при прямих ударах блискавки (ПУБ) в провід ЛЕП, або зрізана хвиля після перекриття ізоляції лінії, або крута хвиля при ПУБ в опорі (трос) з подальшим перекриттям лінійної ізоляції, або індуковані імпульси напруги при ударі блискавки поблизу проводу лінії.

Всі хвилі перенапруги грозового характеру будуть небезпечні не тільки високою амплітудою, а й різною формою, фронтом і тривалістю.

Імпульсна хвиля напруги, що розповсюджується по лінії деформується і загасає через опір землі і імпульсну корону, що утворюється. На утворення чохла корони витрачається енергія, поява електродинамічної ємності згладжує фронт, а короткий або зрізаний імпульс в цей час знижує амплітуду хвилі.

Зниження амплітуди і подовження фронту повної хвилі перенапруги за рахунок активних втрат можна оцінити за:

$$U_0 = U_{max} \exp(-\alpha\sqrt{x});$$

$$\Delta\tau_{\phi} = (0,5 + (0,008U_{max}) / h)(1 / K),$$

де  $U_{max}$  - амплітуда імпульсу напруги в місці удару блискавки, кВ;

$x$  - відстань розрахункової точки від місця ПУБ, км;

$\alpha$  - коефіцієнт, що дорівнює 0,07-0,5 км для ЛЕП 110 кВ і вище;

$H$  - середня висота підвісу проводів, м;

$K$  - коефіцієнт, що дорівнює 1,0; 1,1; 1,45; 1,55 при кількості проводів в фазі відповідно 1, 2, 3, 4 і більше.

Обмеження хвиль перенапруги, що надходять на ізоляцію обладнання, здійснюється обмежувачами перенапруг та вентильними розрядниками, мало відповідальну або високого рівня грозостійкості ізоляцію можна захистити трубчастими розрядниками.

Місце установки цих пристроїв вибирається з урахуванням можливих поєднань форм і амплітуд імпульсів перенапруг.

Крім обмеження хвиль перенапруг, що набігають на електрообладнання з боку ЛЕП влаштовується грозозахист ізоляції відкритих розподільних пристроїв станцій і підстанцій від ПУБ.

Щоб виключити цю ситуацію, ділянки ПЛ, що примикають до підстанції, довжиною  $1 \div 3$  км у всіх випадках захищаються від прямих ударів блискавки тросовими блискавковідводами.

Віддалені від підстанції удари блискавки в провід можуть привести до появи в розряднику струму, що не перевищує значення  $2U_{50\%z} / Z_{нрк}$ , де  $Z_{нрк}$  - хвильовий опір провoda з урахуванням корони.

Наприклад, для ПЛ 110 кВ при  $U_{50\%z} = 700$  кВ і  $Z_{нрк} = 360$

$$\text{Ом} \quad I_p < \frac{2 \cdot 700}{360} = 3,9 \text{ кА.}$$

Такий захисний підхід (часто його називають небезпечною зоною або захищеним підходом) виконує ще одну важливу функцію - під дією імпульсної корони знижує крутизну фронту імпульсу, що виник на лінії на початку підходу. Тому його довжина повинна бути така, щоб крутизна хвилі, що прийшла на підстанцію, знизилася до безпечного рівня.

### **10. 1. Принципи захисту електрообладнання підстанцій від набігаючих хвиль грозового походження**

Основними апаратами захисту обладнання підстанцій від набігаючих по ПЛ хвиль грозового походження є нелінійні обмежувачі перенапруг (ОПН) і вентиляльні розрядники (РВ), встановлені на підстанціях.

Для забезпечення ефективності захисту електрообладнання підстанції від набігаючих хвиль необхідно:

- обмежити струм розрядника величиною струму координації;

- обмежити крутизну набігаючої хвилі до безпечного рівня.

Струм координації – це значення струму через розрядник, при якому значення напруги, що залишається, що відповідає йому, на розряднику координується з імпульсним рівнем ізоляції обладнання, що захищається.

Необхідність обмеження струму через розрядник можна пояснити наступним.

При близьких ударах в провід струм блискавки  $I_\sigma$  розподіляється обернено пропорційно опорам заземлення опори  $R_i$  і розрядника  $R_p$ .

Струм через розрядник буде дорівнювати:

$$I_p = I_m \cdot R_i / (R_i + R_p).$$

Наприклад, при струмі  $I_p = 10$  кА напруга, що залишається на ОПН 110/80 10 11УХЛ1  $U_{зал} = 243$  кВ і його опір

$$R_p = U_{зал} / I_p = 243 / 10 = 24,3 \text{ Ом.}$$

Тоді при струмі блискавки  $I_m = 60$  кА і  $R_i = 10$  Ом струм через ОПН буде дорівнювати  $I_p = 17,5$  кА, що неприпустимо, якщо струм координації обраний рівним 10 кА.

## 10. 2. Основні характеристики ОПН

**Найбільша тривало допустима робоча напруга** ( $U_{нро}$ , кВ) - найбільша діюча напруга промислової частоти, яка необмежено довго може бути прикладена до виводів обмежувача.

**Номинальна напруга** ( $U_n$ , кВ) - діюче значення напруги промислової частоти, яке обмежувач може витримувати протягом 10 с після впливу на нього імпульсів струму з нормованими параметрами. Номинальна напруга має бути не менше 1,25 найбільшій тривало допустимій робочій напругі.

За стандартом МЭК 99-4 ОПН повинен витримувати цю величину протягом 10 секунд після попереднього нагрівання до  $60^\circ \text{C}$  і впливу двох імпульсів струму, що відповідають класу питомої енергоємності даного типу обмежувача,  $U_n \cong 1,25U_{нро}$  [7].

**Характеристика «напруга - час»** - залежність діючого значення напруги промислової частоти, що витримується ОПН від часу його застосування. Показує максимальний проміжок часу, протягом якого до ОПН може бути прикладена напруга промислової частоти, що перевищує  $U_{нро}$  (або  $U_n$  в залежності від виду характеристики), не викликаючи пошкодження або термічної нестійкості.

Характеристики «напруга - час» ( $U/U_{нро} = f(t)$  або  $U/U_n = f(t)$ ) надаються виробниками графічно найчастіше в напівлогарифмічному масштабі або в табличному варіанті. Характеристики даються для випадку з попередніми навантаженням ОПН імпульсами струму з нормованими параметрами, а іноді і для випадку без навантаження.

**Напруга, що залишається при нормованому струмі комутаційних перенапруг** ( $U_{злк}$ , кВ) - напруга на обмежувачі при протіканні нормованого струму  $I_{нк}$  комутаційних перенапруг ( $I_{нк} = 125 \div 2000$  А в залежності від класу напруги мережі). Нормована форма хвилі імпульсу струму - 30/60 мкс або 1,2 / 2,5 мс.

**Напруга, що залишається при нормованому струмі грозових перенапруг** ( $U_{залг}$ , кВ) - напруга на обмежувачі при протіканні нормованого струму грозових перенапруг. Нормована форма імпульсу струму 8/20 мкс, нормовані амплітуди  $U_{нг} = 3 \div 20$  кА в залежності від класу напруги обмежувача і необхідного рівня захисту від грозових перенапруг.

**Номінальний розрядний струм ОПН** ( $I_{ном}$ , кА) - максимальне значення амплітуди грозового імпульсу струму 8/20 мкс, що використовується для класифікації обмежувача і характеризує його властивості в режимі обмеження грозових перенапруг.

**Струм пропускної здатності обмежувача** ( $I_{2000}$ , кА) - амплітуда прямокутного імпульсу струму тривалістю не менш як 2000 мкс, який прикладається до обмежувача в процесі випробувань на пропускну здатність.

**Пропускна здатність** - гарантована здатність обмежувача витримувати вплив не менше 18 разів струму  $I_{2000}$  без пробою, перекриттів і втрати робочих якостей.



**Імпульс великого струму ОПН ( $I_{max}$ , кА)** - максимальне (амплітудне) значення розрядного струму, що має форму імпульсу 4/10 мкс, який використовується для перевірки стійкості обмежувача до близьких і прямих ударів блискавки. Є консервативною оцінкою енергетичної стійкості до грозових імпульсів.

**Струм вибухобезпеки або струм спрацьовування противибухового пристрою ( $I_{спрац}$ , кА)** - значення струму однофазного або трифазного (більшого з них) короткого замикання, при якому не відбувається вибухового руйнування покриття ОПН, а якщо вона пошкоджується, то її елементи знаходяться всередині нормованої зони.

**Питома енергоємність обмежувача ( $W_{н.ОПН}$ , кДж/кВ)** - значення енергії, що поглинається обмежувачем при впливі одного (іноді двох) імпульсу струму пропускної здатності і віднесеної до 1 кВ найбільшої тривало допустимої напруги ( $U_{нро}$ ) або номінальної напруги обмежувача ( $U_n$ ). Використовується для класифікації ОПН і характеризує його здатність розсіювати енергію комутаційних перенапруг.

**Повна енергоємність ОПН ( $W_{ОПН}$ , кДж)** - добуток нормованої виробником питомої енергоємності та тієї напруги, по відношенню до якої вона приведена.

**Вольт-амперна характеристика ОПН** - залежність напруги на ОПН від амплітуди імпульсного струму, що протікає через нього.

### **10.3. Вибір ОПН для захисту обладнання підстанцій 6 ÷ 35 кВ**

### 10.3.1. Вибір найбільшої тривало допустимої робочої напруги ОПН

Найбільша тривало допустима робоча напруга ОПН ( $U_{нро}$ ) є однією з основних характеристик ОПН, що визначає надійність його роботи при впливі як квазістаціонарних, так і грозових і комутаційних перенапруг. ОПН не призначений для обмеження квазістаціонарних перенапруг і захисту від них [6,14] і відповідним чином повинен бути від них відбудований.

Найбільша тривало допустима робоча напруга обмежує відповідно одній з точок характеристики «напруга - час» для нескінченно великого ( $25 \div 30$  років) часу впливу даної напруги. Тому значення  $U_{нро}$  має бути вибрано таким, щоб характеристика «напруга - час» ОПН лежала вище характеристики «напруга - час» мережі (рис. 7.1).

Характеристика «напруга - час» мережі являє собою сукупність точок, що відповідають значенням квазістаціонарних напруг і їх тривалостей, що діють на ОПН.

Більшість пошкоджень ОПН в мережах  $6 \div 35$  кВ з ізолюваною або компенсованою нейтраллю відбувається через впливи дугових або ферорезонансних перенапруг.

Правильним вибором найбільшої тривало допустимої робочої напруги ОПН можна відбудувати від багаторазових спрацьовувань при дугових перенапругах і тим самим підвищити надійність його роботи. Тоді як кратність і енергія ферорезонансних перенапруг така, що ні вибором значення  $U_{нро}$ , ні вибором енергоємності неможливо забезпечити безаварійну роботу ОПН при цьому виді перенапруг [6,14].

На підстанціях з ОПН ферорезонансні перенапруги повинні бути виключені оперативними і апаратними заходами.

У більшості випадків вибір найбільшої тривало допустимої робочої напруги ОПН може бути виконаний у спрощений спосіб.

У мережах 6 ÷ 35 кВ, що працюють з ізольованою нейтраллю або з компенсацією ємнісного струму замикання на землю (без обертових машин), запаси електричної міцності ізоляції обладнання досить великі, тому вибір значення  $U_{нро}$  може бути виконаний виходячи з забезпечення надійності тривалої (до 6 годин) роботи ОПН при дугових замиканнях на землю. В даних мережах кратність дугових перенапруг може досягати 3,5, що відповідає максимальному значенню перенапруг

$$U_{дуг} = 3,5 \frac{\sqrt{2}U_{нр}}{\sqrt{3}},$$

де  $U_{нр}$  - найбільша робоча напруга мережі (лінійна), значення якої наведені в табл. 13.

Щоб відбудувати ОПН від дугових перенапруг, треба хоча б виконати умову :

$$U_{зал.к} \geq U_{дуг},$$

де  $U_{зал.к}$  - напруга, що залишається при нормованому струмі комутаційних перенапруг - напруга на обмежувачі при протіканні нормованого струму  $I_{нк}$  комутаційних перенапруг ( $I_{нк} = 125 \div 2000$  А в залежності від класу напруги мережі).

Нормована форма хвилі імпульсу струму - 30/60 мкс або 1,2 / 2,5 мс.

$$U_{зал.к} = (U_{нро} \sqrt{2}) \cdot K_{ком}, \text{ кВ.}$$

Типова кратність обмеження комутаційних перенапруг  $K_{ком}$  при розрахунковому струмі 500 А рівна 2 .

Таблиця 13 - Співвідношення номінальних та найбільших робочих напруг мережі .

Клас напруги електрообладнання, кВ	Найбільша робоча напруга електрообладнання, кВ	Номінальна напруга електричної мережі $U_{ном}$ , кВ	Найбільша тривало допустима робоча напруга в електричній мережі $U_{нр}$ , кВ
6	7,2	6,0	6,9
		6,6	7,2
10	12	10,0	11,5
		11,0	12,0
35	40,5	35,0	40,5

Тоді умова вибору

$$U_{нро} \geq (1,0 \div 1,05) U_{нр}.$$

Таким чином, значення найбільшого тривало допустимої робочої напруги ОПН в залежності від класу напруги повинно знаходитися в межах, зазначених у табл. 14.

В мережах 6 ÷ 10 кВ, що працюють з ізольованою нейтраллю або з компенсацією ємнісного струму замикання на землю, що мають обертові машини, час роботи машин в режимі однофазного замикання на землю (ОЗЗ) обмежено, тому що запаси електричної міцності її ізоляції істотно менше, ніж у іншого обладнання.

Таблиця 14 – Значення  $U_{нро}$  для мереж 6÷35 кВ з ізольованою або компенсованою нейтраллю без оберткових машин.

Клас напруги, кВ	6	10	35
$U_{нро}$ , кВ	7,2÷7,6	12,0÷12,6	40,5÷42,5

Тому значення  $U_{нро}$  має визначатися з урахуванням характеристики «напруга - час» ОПН за формулою:

$$U_{нро} \geq U_{нр} / K_t,$$

де  $K_t$  - коефіцієнт, що дорівнює відношенню допустимої для ОПН напруги протягом часу існування ОЗЗ ( $t_{оз}$ ) до  $U_{нро}$ , який визначається для заданого значення  $t_{оз}$  характеристики «напруга - час» з попередніми навантаженнями[7].

Для більшості ОПН, що випускаються, характеристика «напруга - час» ( $K_t = f(t)$ ) в напівлогарифмічній системі координат становить пряму лінію для досить широкого інтервалу значень часу, яка легко може бути представлена рівнянням

$$K_t = a - b \cdot \lg t.$$

Значення коефіцієнтів  $a$  і  $b$  і відповідні їм інтервали часу наведені в додатку 2 табл. 1.

Визначати значення коефіцієнта  $K_t$  за рівнянням більш зручно, ніж за графіком.

Якщо характеристика «напруга - час» приведена щодо номінальної напруги ОПН  $U_n$  ( $K_t = U/U_n$ ), то  $U_{нро}$  визначається за формулою  $U_{нро} = U_{нр}/1,25K_t$ .

Вибір найбільш тривало допустимої робочої напруги ОПН в мережах з резистивним заземленням нейтралі повинен проводитися на основі аналітичних розрахунків або комп'ютерного моделювання з урахуванням величини резистора і максимальної тривалості ОЗЗ. Нормоване значення  $U_{нро}$ , що визначене підприємством-виробником для кожного типу ОПН, дійсно для температури навколишнього середовища до  $45^\circ \text{C}$  з урахуванням додаткового нагріву від сонячної радіації.

Якщо є інші джерела підвищених температур близько обмежувача, які тривалий час впливають на ОПН, і температура навколишнього середовища перевищує  $45^\circ \text{C}$ , то розра-

хункове значення  $U_{нро}$  збільшують на 2% для кожних п'яти градусів перевищення температури. Значення найбільшої тривало допустимої робочої напруги обмежувача вибирають з номенклатури виробів підприємства-виробника (додаток 1), яка повинна бути не нижче розрахункового значення, отриманого відповідно до цього пункту.

### 10.3.2. Вибір енергоємності та струму пропускної здатності ОПН

Всі обмежувачі як по пропускній здатності, так і по енергоємності діляться на 5 класів (табл. 15).

Таблиця 15 - Класи пропускної здатності ОПН

Класи пропускної здатності	Пропускна здатність, А	Питома енергія, кДж/кВ, не менше
1	Від 250 до 400 включно	1,0
2	Від 401 до 750 включно	2,0
3	Від 751 до 1100 включно	3,2
4	Від 1101 до 1600 включно	4,5
5	Понад 1601	7,1

У ряді каталогів при класифікації наводяться не значення амплітуди прямокутного імпульсу тривалістю 2000 мкс  $I_{2000}$ , а амплітуди струму формою 1,2 / 2,5 мс  $I_{1,2/2,5}$  і прямокутного імпульсу тривалістю 4 мс  $I_4$ .

У цьому випадку відповідні значення  $I_{2000}$  можуть бути знайдені як  $I_{2000} \approx (1,33 \div 1,43)I_{1,2/2,5}$  і  $I_{2000} \approx (1,33 \div 1,43)I_4$ .

Якщо клас енергоємності збільшується - вартість ОПН зростає.

За відсутності спеціальних вказівок з вибору класу енергоємності вибирається найбільш економічний, а потім проводиться його перевірка на відповідність до умов експлуатації.

Одним з найбільш небезпечних енергетичних впливів на обмежувач є комутаційні перенапруги при відключенні довгих кабельних ліній і конденсаторних батарей з повторними пробоями між контактами вимикача.

Енергія  $W_{опн}$ , Дж, яку повинен поглинути обмежувач, може бути наближено визначена за формулою [7]:

$$W_{опн} = 0,5C \cdot \left[ (K_n \cdot U_{нрф})^2 - (1,77 \cdot U_{нро})^2 \right],$$

де  $C$  – ємність кабелю або батареї конденсаторів, мкФ;  
 $K_n$  – кратність перенапруг, рекомендується  $K_n=3$ ;  
 $U_{нрф}$  – найбільша робоча фазна напруга, кВ.

Енергоємність обраного обмежувача повинна бути більше розрахункового значення.

За умови відбудови ОПН від дугових перенапруг в електричних мережах 6 ÷ 35 кВ для захисту електрообладнання від перенапруг можуть бути застосовані ОПН з питомою енергоємністю 2 ÷ 3 кДж / кВ  $U_{нро}$  і струмом пропускнуї здатності  $I_{2000} = 400 \div 600$  А.

В деяких особливих випадках, наприклад при виборі ОПН для захисту мереж власних потреб електростанцій, при роботі ОПН в мережах, де можливі часті обриви проводів; в мережах з вакуумними вимикачами і високовольтними двигунами і т. п., потрібно більш детальне опрацювання режимів роботи ОПН і визначення необхідних значень енергоємності та пропускнуї здатності [7].

### **10.3.3. Вибір номінального розрядного струму ОПН**

Вибір номінального розрядного струму здійснюють у випадку установки ОПН для захисту від грозових перенапруг.

Номінальний розрядний струм приймається рівним 10 кА в наступних випадках:

- в районах з інтенсивною грозовою діяльністю більше 50 грозових годин на рік;

- в мережах з повітряними лініями на дерев'яних опорах;

- в схемах захисту двигунів і генераторів, приєднаних до повітряних ліній;

- в районах з високим ступенем промислових забруднень (IV СЗА) або якщо обмежувач розташований менш ніж на 1000 м від моря;

- якщо пред'являються підвищені вимоги до надійності блискавкозахисту.

У всіх інших випадках номінальний розрядний струм приймається рівним 5 кА.

ОПН, обраний по розрахунковим значенням найбільшої тривало допустимої робочої напруги, а також по енергоємності та пропускній здатності, повинен бути перевірений на достатність інших його характеристик.

Якщо перевірка дасть з яких-небудь характеристик негативний результат, то повинен бути обраний інший ОПН з необхідними характеристиками.

### **10.3.4. Визначення захисного рівня ОПН під час грозових перенапруг**

Вибір і розстановка ОПН на підстанції визначаються надійністю блискавкозахисту електрообладнання, перш за все трансформатора.



Випробувальні напруги електрообладнання 6 ÷ 35 кВ координуються з напругою вентиляльних розрядників, що залишилась [8] при струмі координації 5 кА, тому що напруги обмежувачів, що залишаються, повинні бути не вище відповідних напруг розрядників 3-й або 4-ї групи за ГОСТ 16357, наведених в табл. 16.

Випробувальні напруги електрообладнання 6 ÷ 35 кВ координуються з залишаються напругою вентиляльних розрядників [8] при струмі координації 5 кА, тому що залишаються напруги обмежувачів повинні бути не вище відповідних напруг розрядників 3-й або 4-ї групи по ГОСТ 16357, наведених в табл. 7.3.

Таблиця 16 - Максимальні значення напруг, що залишаються при грозовому імпульсі обмежувачів для електричних мереж 6 ÷ 35 кВ

Клас напруг, кВ	3	6	10	15	20	35
$U_{зал.г}$ , кВ, при $I_{нг} = 5$ кА, 8/20 мкс	14	27	45	61	80	130

Напруга обраного ОПН, що залишається  $U_{зал.г}$  при відповідному значенні розрядного струму (струму координації 5 або 10 кА) має бути скоординована з випробувальною напругою повної хвилі  $U_{ngi}$  обладнання, яке підлягає захисту (табл. 17).

Таблиця 17 - Значення випробувальних напруг обладнання електричних мереж 6 ÷ 35 кВ повним грозовим імпульсом

Клас напруг, кВ	3	6	10	15	20	35
$U_{ngi}$ , кВ	40	60	75	95	125	190

Координаційний інтервал  $\Delta U$  повинен бути не менше 20 %,

$$\Delta U = \frac{U_{nzi} - U_{зал.з}}{U_{nzi}} \cdot 100\%.$$

Під час заміни вентилярних розрядників на ОПН перехід від відстаней для вентилярних розрядників до трансформаторів, що захищаються, нормованих ПУЕ, до допустимих відстаней для ОПН можна оцінити за формулою:

$$L_{ОПН} = L_{РВ} \cdot \frac{U_{nzi} - U_{ОПН}}{U_{nzi} - U_{РВ}},$$

де  $L_{ОПН}$  - допустима відстань від ОПН до трансформатора, що захищається;

$L_{РВ}$  - допустима відстань нормована ПУЕ від розрядника до трансформатора, що захищається;

$U_{ОПН}$  і  $U_{РВ}$  - напруги, що залишаються на ОПН та РВ відповідно при струмі 5 (10) кА.

## 11. Приклади вибору ОПН

### Приклад 1.

Електрична підстанція живить повітряну мережу 35 кВ зі 100% компенсацією ємнісного струму. Найбільша напруга мережі  $U_{нм} = 37$  кВ. Ємнісний струм мережі  $I_m = 25$  А. Допустимий час роботи мережі при однофазному замиканні на землю більше двох годин. У мережі є ПЛ з дерев'яними опорами. На підстанції встановлені вимірювальні трансформатори напруги типу НАМИ. Максимальне значення струму короткого замикання (3-фазне к. з.) на шинах 35 кВ становить 14 кА. Інтенсивність грозової діяльності  $n = 50$  годин.

**Зробити вибір ОПН для захисту обладнання підстанції з боку 35 кВ.**

*Вибір найбільшої тривало допустимої робочої напруги ОПН.* Мережа не має обертових машин і працює з компенсацією ємнісного струму, тому відповідно до вибору найбільшої тривало допустимої робочої напруги ОПН (табл. 18) значення  $U_{нро}$  має перебувати в межах  $40,5 \div 42,5$  кВ.

Таблиця 18 - Значення  $U_{нро}$  для мереж 6÷35 кВ з ізолюваною або компенсованою нейтраллю без обертових машин

Клас напруги, кВ	6	10	35
$U_{нро}$ , кВ	7,2÷7,6	12,0÷12,6	40,5÷42,5

*Вибір енергоємності та пропускної здатності ОПН.*

За умови відбудови ОПН від дугових перенапруг в електричних мережах 35 кВ для захисту електрообладнання від перенапруг можуть бути застосовані ОПН з питомою енергоємністю  $2 \div 3$  кДж / кВ  $U_{нро}$  і струмом пропускної здатності  $I_{2000} = 400 \div 600$  А [25].

*Вибір номінального розрядного струму ОПН.* У електричній мережі є повітряні лінії на дерев'яних опорах, інтенсивність грозової діяльності  $n = 50$  годин, тому відповідно до вибору номінального розрядного струму вибираємо значення  $I_n = 10$  кА. З додатку 1, табл. Д1, на основі вищенаведених значень характеристик ОПН, вибираємо обмежувач виробництва ЗАТ «Фенікс-88» типу ОПН-35 / 40,5-10 / 450-II УХЛ1 з характеристиками, наведеними в табл. 19.

*Визначення захисного рівня ОПН при грозових перенапругах.* Значення напруги, що залишається при грозовому імпульсі при струмі 5 кА (126 кВ, табл. 19) не повинно бути вище відповідного значення з табл. 20 (130 кВ). Ця умова виконується.

Таблиця 19 - Характеристики ОПН-35/40,5-10/450-ПУХЛ1

$U_{нро}$ , кВ	$U_n$ , кВ	$I_{2000}$ , А	$I_{ср}$ , А	$L_{в}$ ит, с	$W_{опн}$ , кДж	$U_{залг}$ , при струмах, А			$U_{залг}$ , при $I$ , кА		$U/U_{нро} = a - b \lg t$	
						250	500	1000	5	10	a	b
40,5	54	450	20	91	202,5	100	103	108	126	136	1,458	0,07

**Примітка.** Рівняння  $U / U_{нро} = a - b \cdot \lg t$  справедливо для діапазону часу від 0,1 с до 24 годин.

Таблиця 20 - Максимальні значення напруг, що залишаються при грозовому імпульсі обмежувачів для електричних мереж 6÷35 кВ

Клас напруги, кВ	3	6	10	15	20	35
$U_{залг}$ , кВ, при $I_{нз} = 5$ кА, 8/20 мкс	14	27	45	61	80	130

Напруга, що залишається на ОПН  $U_{залг}$  при струмі координації, в даному випадку рівному номінальному розрядному струму 10 кА, має бути скоординованою з випробувальною напругою повною хвилею  $U_{нзи}$  обладнання, що захищається.  $U_{залг} = 136$  кВ (табл. 19),  $U_{нзи} = 190$  кВ. Тоді координаційний інтервал:

$$\Delta U = \frac{U_{нзи} - U_{залг}}{U_{нзи}} 100 = 28,4 \%,$$

що більше допустимих 20 %.

Допустима відстань до трансформатора, що захищається може бути оцінена за формулою:

$$L_{опн} = L_{рв} \frac{U_{нзи} - U_{опн}}{U_{нзи} - U_{рв}},$$

де  $L_{pв}$  – допустима відстань від розрядника до трансформатора, що захищається, що нормується ПУЕ;

$U_{опн}$  і  $U_{pв}$  – напруги, що залишаються відповідно на ОПН і РВ при струмах 5 (10) кА.

Для вентильного розрядника РВС-35  $U_{pв}=150$  кВ при струмі 10 кА. Тоді

$$L_{опн} = L_{pв} \frac{190-136}{190-150} = 1,35L_{pв}.$$

*Визначення захисного рівня ОПН при комутаційних перенапругах.*

Значення однохвилинних випробувальних напруг для обладнання категорії б (табл. 21) рівні: для силових трансформаторів - 85 кВ; для іншого обладнання - 95 кВ.

Таблиця 21 - Значення однохвилинних випробувальних напруг для електрообладнання 6÷35 кВ.

Клас напруги, кВ	3		6		10		15		20		35	
	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б
Трансформатори, шунтуючі реактори, ДГР	10	18	20	25	28	35	38	45	50	55	80	85
Інше електрообладнання	10	24	20	32	28	42	38	55	50	65	80	95

Тоді значення напруг, що витримує ізоляція складуть:

– для силових трансформаторів

$$U_{випр} = K_i K_{\kappa} \sqrt{2} U_{1.xв} = 1,35 \cdot 0,9 \cdot \sqrt{2} \cdot 85 = 146 \text{ кВ};$$

– для іншого обладнання

$$U_{випр} = K_i K_{\kappa} \sqrt{2} U_{1.xв} = 1,1 \cdot 1,0 \cdot \sqrt{2} \cdot 95 = 147,8 \text{ кВ}.$$

Запас  $\Delta U_{\kappa}$  при обмеженні комутаційних перенапруг при струмі  $I_{\kappa}=500$  А і напрузі, що залишається  $U_{500}=103$  кВ:

$$\Delta U_{\kappa} = \frac{U_{\text{випр}} - U_{500}}{U_{\text{випр}}} 100 = \frac{146 - 103}{146} 100 = 29,5\%,$$

що більш ніж достатньо.

Значення напруги обраного ОПН, що залишається при струмі 500 А перевищує мінімальне значення напруги  $U_{500} = 99$  кВ [7]. Отже, даний ОПН відбудований від небезпечних впливів дугових перенапруг.

Таблиця 22 - Мінімальні значення напруги, що залишається  $U_{500}$  для відбудови від перенапруг, що визвані однофазним замиканням на землю

Клас напруги, кВ	3	6	10	15	20	35
$U_{\text{залк}}$ при імпульсі 30/60 мкс 500 А	9	18	29	43	59	99

У той же час можна визначити розрахунковий струм комутаційних перенапруг при дугових замиканнях з 10%-ою недокомпенсацією по параметру  $f$ :

$$f = \left( \frac{50Z}{U_{\phi}} \right)^{\alpha} \sqrt{\frac{U_{\phi}}{A}},$$

де  $\alpha=0,04 \div 0,05$  – степінь нелінійності варисторів;

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{нм}} \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = \frac{37\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 30,2 \text{ кВ};$$

$$\ell_o = \frac{U_{\phi}}{314I_{\text{кз}}} = \frac{30,2}{314 \cdot 14} = 0,00687 \text{ Гн};$$

$$C_o = \frac{I_c}{0,942U_{\phi}} = \frac{25}{0,942 \cdot 30200} = 0,000879 \text{ Ф};$$

$$C_M=0,4 \cdot C_o=0,4 \cdot 0,000879=0,000352 \text{ Ф};$$

$$Z = \sqrt{\frac{1,5 \cdot 0,00687}{2(0,000879 + 0,000352)}} = 2,046 \text{ Ом.}$$

$$\text{Прийmemo } \alpha=0,04. \text{ Тоді } A = \frac{U_{500}}{500^\alpha} = \frac{103000}{500^{0,04}} = 80300.$$

$$f = \left( \frac{50Z}{U_\phi} \right)^\alpha \sqrt[\alpha]{\frac{U_\phi}{A}} = \frac{50 \cdot 2,046}{30200} \sqrt[0,04]{\frac{30200}{80300}} = 8,17 \cdot 10^{-14}.$$

Рівень обмеження перенапруг при дугових замиканнях на землю:

$$\frac{U_{зал}}{U_\phi} = 1,692 f^{-0,0215} = 3,23.$$

По рівню обмеження перенапруг при дугових замиканнях на землю визначається розрахункове значення комутаційного струму:

$$I_\kappa = \alpha \sqrt[\alpha]{\frac{U_{зал}}{A}} = 0,04 \sqrt[0,04]{\frac{3,23 \cdot 30200}{80300}} = 129,5 \text{ А.}$$

*Перевірка по вибухобезпечності і довжині шляху витоку.*

З урахуванням 10%-го запасу струм спрацьовування противибухового пристрою повинен бути не менше

$$1,1 \cdot I_{\kappa.з.} = 1,1 \cdot 14 = 15,4 \text{ кА. У вибраного ОПН } I_{cp}=20 \text{ кА.}$$

Довжина шляху витоку ОПН  $L_{вум}=91$  см, що більше нормованого значення, рівного 75 см (табл. 23).

Таблиця 23 - Мінімальні довжини шляху витоку зовнішньої ізоляції ОПН.

Клас напруги, кВ	3	6	10	15	20	35
Довжина шляху витоку, см	7	13	22	31,5	43,2	75

Таким чином, обраний обмежувач відповідає умовам експлуатації.

### **Приклад 2.**

Підстанція живить повітрянокабельну мережу з номінальною напругою 6 кВ. Найбільша напруга мережі 6,6 кВ. Повітряні лінії на залізобетонних опорах. Інтенсивність грозової діяльності 40 годин. Ємнісний струм замикання на землю 120 А. У мережі можлива комутація кабелю з ємністю  $C_k=20$  мкФ. В РП 6 кВ застосовані трансформатори напруги типу НАМИ. Мережа працює зі 100%-ою компенсацією ємнісного струму. Допустима тривалість однофазного замикання на землю 2 години. Струм трифазного к. з. дорівнює 18 кА.

Вибрати тип ОПН для захисту обладнання підстанції 6 кВ.

*Вибір найбільшої тривало допустимої робочої напруги ОПН.*

Мережа не має обертових машин і працює з компенсацією ємнісного струму, тому відповідно до вибору найбільшої тривало допустимої робочої напруги ОПН (табл. 17) значення  $U_{нро}$  має перебувати в межах  $7,2 \div 7,6$  кВ.

*Вибір енергоємності та пропускної здатності ОПН.*

За умови відбудови ОПН від дугових перенапруг в електричних мережах 6 кВ для захисту електрообладнання від перенапруг можуть бути застосовані ОПН з питомою енергоємністю  $2 \div 3$  кДж / кВ  $U_{нро}$  і струмом пропускної здатності  $I_{2000} = 400 \div 600$  А [18]. Значення напруги, що залишається на обмежувачі при впливі імпульсу 30/60 мкс 500 А повинно бути не нижче 18 кВ (табл. 22).



За табл. Д.1 попередньо виберемо обмежувач виробництва ЗАТ «Завод енергозахисних пристроїв» типу ОПН-6 / 7,2-10 / 550-II УХЛ1 з характеристиками, наведеними в табл. 24.

Таблиця 24 - Характеристики ОПН-6/7,2-10/550-ПУХЛ1

$U_{нро},$ кВ	$U_n,$ кВ	$I_{2000},$ А	$I_{ср},$ А	$L_y,$ см	$W_{опн},$ кДж	$U_{остк},$ при то-			$U_{остк},$ при I,	
						ках, А			кА	
						250	500	1000	5	10
7,2	–	550	40	34	20,9	17,2	18	19	21,2	23

У мережі можлива комутація високовольтного кабелю з ємністю 20 мкФ. Енергія  $W_{опн}$ , Дж, яку має поглинути обмежувач при комутації кабельної лінії з повторними пробоями між контактами вимикача:

$$W_{опн} = 0,5 \cdot C [(K_n U_{нс})^2 - (1,77 U_{нро})^2] =$$

$$= 0,5 \cdot 20 [(3 \cdot 6,6)^2 - (1,77 \cdot 7,2)^2] = 919,8 \text{ Дж.}$$

*Вибір номінального розрядного струму ОПН.*

Номінальний розрядний струм обраного ОПН становить 10 кА.

*Визначення захисного рівня ОПН при грозових перенапругах.*

Значення напруги, що залишається при грозовому імпульсі при струмі 5 кА (21,2 кВ, табл. 24) не повинно бути вище відповідного значення з табл. 19 (27 кВ). Ця умова виконується.

Напруга, що залишається на ОПН  $U_{залг}$  при струмі координації, він може бути прийнятий рівним 5 кА, має бути скоординована з випробувальною напругою  $U_{ngi}$  обладнання, що захищається повною хвилею  $U_{залг} = 21,1$  кВ,  $U_{ngi} = 60$  кВ (табл. 16). Тоді координаційний інтервал

$$\Delta U = \frac{U_{нзп} - U_{зале}}{U_{нзп}} 100 = 64,7 \%,$$

що більше допустимого 20 %.

Допустима відстань від вентиляного розрядника до обладнання, яке підлягає захисту для підстанцій класу 6 кВ не регламентується. Однак напруга, що залишається на вентилянному розряднику при струмі 5 кА (27 кВ) більше відповідного значення ОПН, тому ОПН може бути установлений на місце, передбачене для розрядника.

*Визначення захисного рівня ОПН при комутаційних перенапругах.*

Значення однохвилинних випробувальних напруг для обладнання категорії б (табл. 21): для силових трансформаторів - 25 кВ; для іншого обладнання - 32 кВ.

Тоді значення напруг, що витримує ізоляція складуть:

– для силових трансформаторів

$$U_{випр} = K_i K_k \sqrt{2} U_{1хв} = 1,35 \cdot 0,9 \cdot \sqrt{2} \cdot 25 = 43 \text{ кВ};$$

– для іншого обладнання

$$U_{випр} = K_i K_k \sqrt{2} U_{1хв} = 1,1 \cdot 1,0 \cdot \sqrt{2} \cdot 32 = 49,8 \text{ кВ}.$$

Запас  $\Delta U_k$  при обмеженні комутаційних перенапруг при струмі  $I_k=500$  А і напрузі, що залишилась  $U_{500}=18$  кВ:

$$\Delta U_k = \frac{U_{випр} - U_{500}}{U_{випр}} 100 = \frac{43 - 18}{43} 100 = 58 \%,$$

що більше ніж достатньо.

Розрахунковий струм комутаційних перенапруг при дугових замиканнях з 10%-ою недокомпенсацією може бути визначений по параметру  $f$ :

$$f = \left( \frac{50Z}{U_\phi} \right)^\alpha \sqrt{\frac{U_\phi}{A}},$$

де  $\alpha=0,04 \div 0,05$  – степінь нелінійності варисторів;

$$U_\phi = \frac{U_{ис} \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = \frac{6,6\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 5,39 \text{ кВ.}$$

$$\ell_o = \frac{U_\phi}{314I_{кз}} = \frac{5,39}{314 \cdot 18} = 0,000954 \text{ Гн};$$

$$C_o = \frac{I_c}{0,942U_\phi} = \frac{120}{0,942 \cdot 5390} = 0,0236 \text{ Ф};$$

$$C_m = 0,4 \cdot C_o = 0,4 \cdot 0,0236 = 0,00944 \text{ Ф};$$

$$Z = \sqrt{\frac{1,5\ell_o}{2(C_o + C_m)}}; \quad Z = \sqrt{\frac{1,5 \cdot 0,000954}{2(0,0236 + 0,00944)}} = 0,0217 \text{ Ом.}$$

Прийmemo  $\alpha=0,04$ . Тоді  $A = \frac{U_{500}}{500^\alpha} = \frac{18000}{500^{0,04}} = 14040,6$ .

$$f = \left( \frac{50Z}{U_\phi} \right)^\alpha \sqrt{\frac{U_\phi}{A}} = \frac{50 \cdot 0,0217}{5390}^{0,04} \sqrt{\frac{5390}{14040,6}} = 8,11 \cdot 10^{-15}.$$

Рівень обмеження перенапруг при дугових замиканнях на

$$\text{землю } \frac{U_{зал}}{U_\phi} = 1,692 f^{-0,0215} = 3,395.$$

За рівнем обмеження перенапруг при дугових замиканнях на землю визначаємо розрахункове значення комутаційного струму:

$$I_\kappa = \alpha \sqrt{\frac{U_{зал}}{A}} = 0,04 \sqrt{\frac{3,395 \cdot 5390}{14040,6}} = 751,7 \text{ А},$$

що більше раніше прийнятого значення рівного 500 А.

Здійснимо розрахунок для  $I_\kappa=1000$  А і  $U_{залк}=19000$  В.

$$A = \frac{U_{1000}}{1000^\alpha} = \frac{19000}{1000^{0,04}} = 14413;$$

$$f = \left( \frac{50Z}{U_\phi} \right)^\alpha \sqrt[\alpha]{\frac{U_\phi}{A}} = \frac{50 \cdot 0,0217}{5390}^{0,04} \sqrt[0,04]{\frac{5390}{14413}} = 4,214 \cdot 10^{-15};$$

$$\frac{U_{зал}}{U_\phi} = 1,692 f^{-0,0215} = 3,443;$$

$$I_\kappa = \sqrt[\alpha]{\frac{U_{зал}}{A}} = \sqrt[0,04]{\frac{3,443 \cdot 5390}{14413}} = 555 \text{ A},$$

що менше 1000 А.

*Перевірка по вибухобезпечності і довжині шляху витоку.* З урахуванням 10%-го запасу струм спрацювання противибухового пристрою повинен бути не менше  $1,1 \cdot I_{\kappa.з.} = 1,1 \cdot 18 = 19,8 \text{ кА}$ . У обраного ОПН  $I_{ср} = 40 \text{ кА}$ . Довжина шляху витоку ОПН  $L_{вит} = 34 \text{ см}$ , що більше нормованого значення, рівного 13 см (табл. 23).

Таким чином, обраний обмежувач відповідає умовам експлуатації.

## **12. Заземлюючі пристрої блискавковідводів і їх розрахунок**

### **12.1. Загальні відомості про конструктивне виконання заземлюючого пристрою електричної підстанції напругою понад 1 кВ**

Заземлюючі пристрої електроустановок вище 1 кВ мережі з ефективно заземленою нейтраллю виконуються з дотри-

манням вимог або до їх опору, або до напруги дотику [8]. Заземлюючий пристрій, що виконується з дотриманням вимог до його опору, повинен мати в будь-яку пору року опір не більше 0,5 Ом, включаючи опір природних заземлювачів. В мережах 35 кВ і нижче з ізольованою нейтраллю допустиме значення опору заземлюючого пристрою визначається за розрахунковим струмом  $I_p$ , рівному ємнісному струму мережі, як  $R_3 \leq 250/I_p$ , але він повинен бути не вище 10 Ом. В мережах з компенсованою нейтраллю розрахунковим струмом є струм замикання на землю, що залишився при відключенні найбільш потужного з компенсуючих апаратів, але не менше 30 А, а для заземлюючих пристроїв, до яких приєднані компенсуючі апарати, - струм, рівний 125% номінального струму цих апаратів. З метою вирівнювання електричного потенціалу і забезпечення приєднання електрообладнання до заземлювача на території, зайнятій електроустановками, прокладаються поздовжні і поперечні горизонтальні заземлювачі, з'єднані між собою і утворюють сітку.

Розміри сталевих заземлювачів не повинні бути менше наступних значень:

чорна та оцинкована кругла сталь для горизонтальних заземлювачів:  $d = 10$  мм;

чорна кругла сталь для вертикальних заземлювачів:  $d = 16$  мм;

то ж, але з оцинкованої сталі:  $d = 12$  мм;

сталь чорна прямокутна: переріз  $s = 100$  мм<sup>2</sup>,  $h = 4$  мм;

сталь чорна кутова:  $s = 100$  мм<sup>2</sup>,  $h = 4$  мм;

сталь чорна трубна:  $d = 32$  мм,  $h = 3,5$  мм, де  $h$  - товщина сталі.

## 12.2. Розрахунок захисного заземлення

### **Вихідні дані:**

Кліматична зона - III, довжина вертикального електроду (стрижня) - 3,00 м, діаметр перерізу вертикального електроду - 0,012 м, питомий опір ґрунту (вологий суглинок) - 130 Ом × м, відстань від поверхні ґрунту до заземлювача (глибина залягання заземлювача) - 0,8 м, напруга електроустановок - 10 000 В.

### **Розрахунок**

У нашому випадку заземлюючий пристрій використовується для електроустановки напругою 10 000 В. Розрахункове значення струму замикання на землю може бути визначено за такою формулою:

$$I_3 = \frac{U_{\text{л}}}{350} (35l_{\text{к}} + l_{\text{в}}) \quad (1)$$

де  $U_{\text{л}}$  - лінійна напруга мережі (на високій стороні трансформаторної підстанції), кВ;

$l_{\text{к}}$ ,  $l_{\text{в}}$  - довжина електрично пов'язаних відповідно кабельних і повітряних ліній, км.

Таким чином, 
$$I_3 = \frac{10}{350} (35 \cdot 50 + 60) = 51,71 \text{ А.} \quad (2)$$

Відповідне отриманому розрахунковому значенню струму замикання на землю нормативне значення опору заземлювального пристрою (ЗП)  $R_3$  знаходимо за формулою:

$$R_3 = 125 / I_3, \quad (3)$$

$$R_3 = 125 / 51,71 = 2,32 \text{ Ом.}$$

При використанні природних заземлювачів необхідний опір штучного заземлювача  $R_{\text{ш}}$  визначається за формулою:

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_{\text{е}} R_3}{R_{\text{е}} - R_3}, \quad (4)$$

де  $R_e$  – опір розтіканню струму штучних заземлювачів, Ом;

$R_{ш}$  – необхідний опір штучного заземлювача, Ом;

$R_3$  – розрахунковий нормований опір ЗП, Ом;

$$R_{ум} = \frac{17 \cdot 2,32}{17 - 2,32} = 2,04 \text{ Ом} \cdot$$

Визначаємо розрахунковий питомий опір землі за формулою:

$$\rho = \rho_{вим} \cdot k, \quad (5)$$

де  $\rho$  – розрахунковий питомий опір землі, Ом·м;

$\rho_{вим}$  – питомий опір землі, отриманий в результаті вимірювань, Ом·м (задано в умовах задачі);

$k$  – коефіцієнт сезонності, який враховує промерзання або висихання ґрунту.

Для кліматичного поясу III –  $k = 1,5$ , отже,

$$\rho = 130 \cdot 1,5 = 195 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

У разі стрижневого круглого перерізу (трубчастого) заземлювача, заглибленого в землю, розрахункова формула опору розтікання струму одиночного вертикального заземлювача  $R_a$  має вигляд:

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+l}{4t-l} \right), \quad (6)$$

де  $\rho$  – розрахунковий питомий опір ґрунту, розрахований за формулою (5), Ом·м

$l$  – довжина вертикального стрижня, м;

$d$  – діаметр перерізу, мм;

$t$  – відстань від поверхні ґрунту до середини довжини вертикального стрижня, м;

$$t = \frac{l}{2} + h_{зазем.} = \frac{3}{2} + 0,8 = 2,3 \text{ м};$$

$h_{\text{зазем.}}$  – глибина заземлювача, м

$$R_{\text{в}} = \frac{195}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \left( \ln \frac{2 \cdot 3}{0,012} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 2,3 + 3}{4 \cdot 2,3 - 3} \right) = 67,69 \text{ Ом.}$$

Наближена кількість вертикальних стрижнів визначається:

$$n' = \frac{R_{\text{в}}}{R_{\text{шт}}},$$

де  $R_{\text{в}}$  – опір розтіканню струму одиночного вертикального заземлювача, обчислений за формулою (6), Ом;

$R_{\text{шт}}$  – необхідний опір штучного заземлювача, обчислений за формулою (4), Ом;

$$n' = \frac{67,69}{2,04} = 33,20.$$

Отримане число стрижнів округляємо до найближчого більшого довідникового значення. Отже,  $n = 40$ .

Визначаємо конфігурацію групового заземлювача (контур) з урахуванням можливості його розміщення на відведеній території та відповідну довжину горизонтальної смуги:

$$l_{\text{гр}} = 1,05 \cdot a \cdot n, \quad (7)$$

де  $a$  – відстань між вертикальними стрижнями, м;  
 $n$  – кількість вертикальних стрижнів;

$$a = k \cdot l_{\text{в}}, \quad (8)$$

де  $k$  – коефіцієнт кратності, рівний 1, 2, 3;

$l_{\text{в}}$  – довжина вертикального стрижня, м.



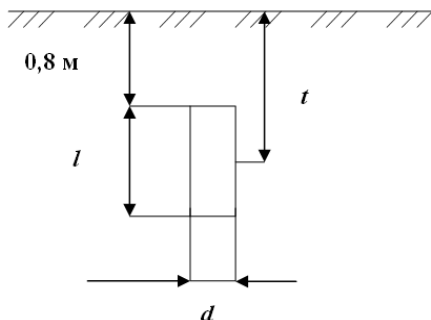


Рисунок 13 – Розміщення вертикального заземлювача в ґрунті.

Коефіцієнт кратності прийемо рівним 2.

$$a = 2 \cdot 3 = 6 \text{ м} \quad , \quad (9)$$

$$l_r = 1,05 \cdot 6 \cdot 40 = 252 \text{ м}. \quad (10)$$

Периметр будівлі:

$$2 \cdot (L + B) = 2 \cdot (18 + 6) = 48 \text{ м}.$$

Обчислюємо опір розтікання струму горизонтального стрижня  $R_{\bar{a}}$ . У разі горизонтального смугового заземлювача розрахунок виконується за формулою:

$$R_{\bar{a}} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l^2}{bt}, \quad (11)$$

де  $\rho$  – питомий опір ґрунту, Ом·м;

$l$  – довжина горизонтальної смуги, м;

$b$  – ширина смуги, м;

$t$  – відстань від поверхні ґрунту до середини ширини горизон-

тальної смуги, м;  $t = \frac{b}{2} + 0,8 = \frac{0,06}{2} + 0,8 = 0,83 \text{ м}$ ;

$$R_{\bar{a}} = \frac{195}{2 \cdot 3,14 \cdot 252} \ln \frac{2 \cdot 252^2}{0,06 \cdot 0,83} = 1,70 \text{ Ом}$$

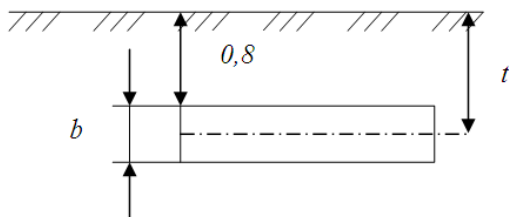


Рисунок 14 – Розміщення горизонтального заземлювача в ґрунті.

Вибираємо коефіцієнти використання вертикальних стрижнів ( $\eta_v$ ) і горизонтальної смуги ( $\eta_z$ ) з урахуванням числа вертикальних стрижнів ( $n$ ) і відношення відстані між стрижнями ( $a$ ) до їх довжини ( $l_B$ ).

$$\frac{a}{l_B} = \frac{6}{3} = 2; \quad \eta_z = 0,29; \quad \eta_v = 0,58.$$

Розрахуємо еквівалентний опір розтікання струму групового заземлювача:

$$R_{гр} = \frac{R_B R_{Г}}{R_B \eta_z + R_{Г} \eta_v \cdot n}, \quad (12)$$

де  $R_B, R_{Г}$  – відповідно опори вертикального стрижня і горизонтальної смуги, обчислені за формулами (6) і (11) відповідно, Ом;

$\eta_v, \eta_z$  – відповідно коефіцієнти використання вертикальних стрижнів і горизонтальної смуги, Ом;

$n$  – кількість вертикальних стрижнів.

$$R_{гр} = \frac{67,69 \cdot 1,70}{67,69 \cdot 0,29 + 1,70 \cdot 0,58 \cdot 40} = 1,95 \text{ Ом.} \quad (13)$$

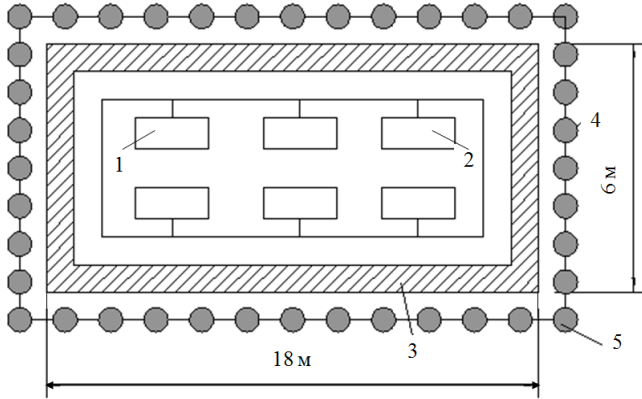


Рисунок 15 - Ескіз розташування заземлювачів: 1 – заземлююче обладнання; 2 - заземлювальний контур; 3 - стіни будівлі; 4 - горизонтальний заземлювач; 5 - вертикальний заземлювач.

Отриманий опір розтікання струму групового заземлювача на повинен перевищувати необхідний нормативний опір

$$R_{zp} \leq R_H \quad (14)$$

1,95 < 2,04. Тобто отриманий опір задовольняє необхідній умові (14). Розраховані параметри ЗП зведемо в таблицю. Таким чином, ми визначили основні конструктивні параметри заземлювача, при яких опір розтікання струму обраного групового заземлювача ( $R_{zp}$ ) не перевищує необхідний опір ( $R_H$ ).

Таблиця 25 - Розраховані параметри заземлювальних пристроїв.

$\rho$ , Ом·м	$l_B$ , м	$k$	$n$ , шт.	$l_r$ , м	$\eta_B$	$\eta_r$	$R_B$ , Ом	$R_r$ , Ом	$R_{rp}$ , Ом	$R_H$ , Ом
195	3	2	40	252	0,58	0,29	67,69	1,70	1,95	2,04

### 12.3. Варіанти індивідуального завдання

№ варіанту	Кліматична зона	Глибина закладання заземлювача від поверхні землі, м	Довжина вертикального електроду, м	Діаметр електроду ззовні, м	Тип ґрунту	Напруга електроустановок, В
1	IV	0,75	3,50	0,05	Пісок	10 000
2	I	0,70	5,00	0,06	Суглинок	10 000
3	II	0,80	3,00	0,06	Глина	6000
4	II	0,70	5,00	0,05	Чорнозем	1000
5	IV	0,75	3,00	0,06	Гравій	10 000
6	III	0,70	5,00	0,05	Торф	1000
7	II	0,80	3,00	0,05	Чорнозем	380
8	IV	0,80	3,00	0,06	Глина	6000
9	II	0,70	3,00	0,05	Пісок	1000
10	III	0,75	3,00	0,03	Торф	6000
11	III	0,80	5,00	0,05	Гравій	1000
12	IV	0,75	5,00	0,05	Глина	10 000
13	III	0,75	5,00	0,06	Пісок	6000
14	II	0,80	5,00	0,05	Торф	6000
15	III	0,80	3,00	0,06	Гравій	6000
16	IV	0,75	5,00	0,06	Пісок	1000
17	II	0,80	5,00	0,05	Чорнозем	6000
18	III	0,80	3,00	0,06	Суглинок	10 000
19	II	0,80	3,00	0,05	Гравій	1000
20	IV	0,80	3,00	0,05	Пісок	10 000
21	III	0,75	3,00	0,04	Чорнозем	10 000
22	IV	0,80	3,00	0,06	Глина	380
23	III	0,80	25,0	0,06	Гравій	10 000
24	II	0,75	3,50	0,05	Глина	1000
25	IV	0,80	3,00	0,06	Суглинок	380

Додаток 1.

**Таблиця 1 - Основні характеристики ОПН виробництва  
ЗАО «Фенікс-88» для застосування в електричних мережах  
6÷220 кВ.**

Тип ОПН	$U_{нро}$ , кВ	$U_{н}$ , кВ	$I_{2000}$ , А	$I_{ср}$ , кА	$L_{у,с}$ м	$W_{опн}$ , кДж	$U_{залк}$ , кВ, при струмах, А			$U_{залг}$ , кВ, при струмах,			
							250	500	1000	0,5	5	10	20
ОПН-6/7,2- 10/250	7,2	10	250	20	15,6	18	19,4	20,2	21,2	20,6	25,3	28,3	32,8
ОПН-6/7,5- 10/250	7,5	10,5	250	20	15,6	18,8	20,9	21,8	22,9	22,1	27,2	30,4	35,2
ОПН-6/8,2- 10/250	8,2	11	250	20	15,6	20,5	19,8	20,5	21,5	20,7	25,6	28,3	33,1
ОПН-6/5,5- 10/450	5,5	7,5	450	20	15,6	27,5	13,4	13,8	14,5	13,8	17,4	18,4	20,7
ОПН-6/6,5- 10/450	6,5	8	450	20	15,6	32,5	15,8	16,4	17,2	16,4	20,7	21,7	24,4
ОПН-6/7,2- 10/450	7,2	10	450	20	15,6	36	17,8	18,4	19,3	18,4	22,5	24,4	27,4
ОПН-10/12- 10/250	12	17	250	20	26	30	32,7	34,1	35,8	34,6	42,6	47,6	55,2
ОПН-10/12,7- 10/250	12,7	18	250	20	26	31,8	35,4	36,9	38,9	37,4	46,5	51,5	59,7
ОПН-10/13,7- 10/250	13,7	18	250	20	26	34,2	33,1	34,2	35,9	34,5	42,8	47,3	55,2
ОПН-10/11- 10/450	11	15	450	20	26	55	26,7	27,7	29	27,7	33,9	36,8	41,3
ОПН-10/12- 10/450	12	16	450	20	26	60	29,2	30,2	31,7	30,2	37,2	40,1	45,1
ОПН-5/40,5- 10/450	40,5	54	450	20	91	202,5	100	103	108	102	126	136	153
ОПН-35/38- 10/800	38	52	800	40	91	304	91,7	92,5	96	94,5	109	118	130
ОПН-35/41- 10/800	41	56	800	40	91	328	98,9	100	104	102	118	127	140

Продовження таблиці Д1													
ОПН–10/73– 10/450	73	96	450	63	227	365	182	188	197	188	230	249	280
ОПН–10/80– 10/450	80	102	450	63	227	400	199	206	216	206	252	274	308
ОПН–10/88– 10/450	88	114	450	63	227	440	208	216	226	216	264	287	322
ОПН–10/73– 10/800	73	96	800	63	227	584	175	178	183	180	208	224	237
ОПН–10/80– 10/800	80	102	800	63	227	640	192	194	201	198	229	247	271

**Примітка.** Струм спрацьовування противибухового пристрою 40 кА.

Додаток 2.

Таблиця Д 1 - Характеристики «напряга – час» для ОПН різних типів і виробників

Тип ОПН	$K_t$	Часовий діапазон $t, c$	Коеф-ти х-ки $K_t = a - b \lg t$			
			Х-ка типу А		Х-ка типу В	
			a	b	a <sub>1</sub>	b <sub>1</sub>
Виробник РК «Тавріда Електрик»						
ОПН КР/TEL	$U/U_{нро}$	0,1 – 10000	1,488	0,052	1,57	0,0525
ОПН РТ/TEL	$U/U_{нро}$	0,1 – 10000	1,46	0,063	1,525	0,0625
ОПН/TEL 6–10	$U/U_{нро}$	0,1 – 10000	1,478	0,062	1,553	0,062
ОПН/TEL 35–220	$U/U_{нро}$	0,1 – 10000	1,373	0,047	1,435	0,045
Виробник ЗАО «Полімер-Апарат»						
ОПНп, $I_{2000} = 550A$	$U/U_{нро}$	0,1 – 21600	1,39	0,057	1,442	0,058
ОПНп, $I_{2000} \geq 800A$	$U/U_{нро}$	0,1 – 21600	1,4256	0,0544	1,503	0,0562
Виробник ЗАО «Феникс-88»						
ОПН 6/7,2 10/250	$U/U_{нро}$	0,1 – 86400	1,4592	0,0688	–	–
ОПН 6/7,5 10/250	$U/U_{нро}$	0,1 – 86400	1,4886	0,0714	–	–
ОПН 6/8,2 10/250	$U/U_{нро}$	0,1 – 86400	1,4443	0,0677	–	–
ОПН 6/5,5 10/450	$U/U_{нро}$	0,1 – 86400	1,4417	0,0673	–	–
ОПН 6/6,5 10/450	$U/U_{нро}$	0,1 – 86400	1,4534	0,0696	–	–
ОПН 6/7,2 10/450	$U/U_{нро}$	0,1 – 86400	1,4592	0,0688	–	–
ОПН10/12 10/250	$U/U_{нро}$	0,1 – 86400	1,4796	0,0704	–	–
ОПН10/12,7 10/250	$U/U_{нро}$	0,1– 86400	1,4798	0,0712	–	–
ОПН10/13,7 10/250	$U/U_{нро}$	0,1– 86400	1,4418	0,0692	–	–
ОПН 10/11 10/450	$U/U_{нро}$	0,1– 86400	1,4488	0,0692	–	–
ОПН 10/12 10/450	$U/U_{нро}$	0,1– 86400	1,4482	0,0688	–	–
ОПН35/40,5 10/450	$U/U_{нро}$	0,1– 86400	1,458	0,07	–	–
ОПН 35/38 10/800	$U/U_{нро}$	0,1– 86400	1,4566	0,0694	–	–
ОПН 35/41 10/800	$U/U_{нро}$	0,1– 86400	1,4572	0,0698	–	–

## ЛІТЕРАТУРА

1. Правила улаштування електроустановок. - Видання офіційне. Міненерговугілля України. - Х. : Видавництво «Форт», 2017. - 760 с.
2. Александров Г. Н. Ограничение перенапряжений в электрических сетях. Учебное пособие. Издание Центра подготовки кадров, 2003 г.
3. Басманов В.Г. Заземление и молниезащита.: Учеб. пособие для вузов в двух частях. Часть 1 Заземление – Киров: Изд-во ВятГУ, 2009. – 155 с.
4. Басманов В. Г. Заземление и молниезащита: Учебное пособие для вузов в двух частях. Часть 2. Молниезащита – Киров: Изд-во ВятГУ, 2010. – 215 с.
5. Василець С. В., Василець К. С. Техніка високих напруг: навчальний посібник [Електронне видання]. – Рівне : НУВГП, 2018. – 187 с.
6. Горелов С. В. Перенапряжения и молниезащита: Учебное пособие / В. Н. Андреев, М. А. Бучельников, С. В. Горелов, В. И. Мухин; Под ред. В.П. Горелова.- 3-е изд., дополн.- Новосибирск: Новосиб. гос. акад. водн. трансп, 2003. – 251 с.
7. Горячкин С.Н., Воробьев А.В. Молниезащита электрических подстанций. Учеб. пособие: / ГОУВПО «Ивановский государственный университет им. В.И. Ленина» – Иваново, 2011. – 200 с.
8. Дмитриев М. В. Применение ОПН в электрических сетях 6-750 кВ / М.В. Дмитриев. – СПб.: НИВА, 2007. – 60 с.
9. ГОСТ 12.1.030.-81. ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление. Введ. 01.07.82 г..
10. Долин П. А. Основы техники безопасности в электроустановках/ П. А. Долин – М.: Энергия.- 1984.-448 с.



11. Иманов Г. М. Защита электрических сетей предприятий нефти и газа от перенапряжений. / Г. М.Иманов, А.А., Пухальский, Ф. Х. Халилов, А. И. Таджибаев- Петербург, Изд. Петербургского энергетического института повышения квалификации Минэнерго России, 1999.
12. Кабышев А. В. Молниезащита электроустановок систем электроснабжения: учебное пособие/ А. В. Кабышев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. -124 с.
13. Козирський В. В. Електропостачання агропромислового комплексу / В. В. Козирський, В. В. Каплун, С. М. Волошин – К.: Аграрна освіта, 2011- 448 с.
14. Притака І. П. Електропостачання сільського господарства. - Київ. Вища школа. 1983. - 343 с.
15. Титков В. В. Перенапряжения и молниезащита: учеб. пособие/ В. В.Титков, Ф. Х. Халилов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011.- 222 с.
16. Электробезопасность. Расчет защитного заземления / Методические указания к выполнению практической работы. - Самара: СамИИТ, 2002. – 18 с.
17. Электрофизические основы техники высоких напряжений: учеб. для вузов / под ред. И.П. Верещагина, В.П. Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 543 с.
18. Халилов Ф.Х. Защита сетей 6 – 35 кВ от перенапряжений/ Ф.Х. Халилов, Г. А. Едокинин, А. И. Таджибаев - Санкт – Петербургское отделение. Энергоатомиздат , 2002.

Навчальне видання

## ЗАХИСТ ВІД ПЕРЕНАПРУГ

Навчально-методичний посібник

на тему:

«Блискавкозахист, захист від атмосферних перенапруг та заземлення блискавковідводів підстанцій та ліній електропередавання»

**ПОПАДЧЕНКО** Світлана Анатоліївна  
**САВЧЕНКО** Олександр Анатолійович

Формат 60×84/16. Гарнітура Times New Roman  
Папір для цифрового друку. Друк ризографічний.  
Ум. друк. арк. 0,6. Наклад 100 пр.  
Державний біотехнологічний університет  
61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44

