

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**



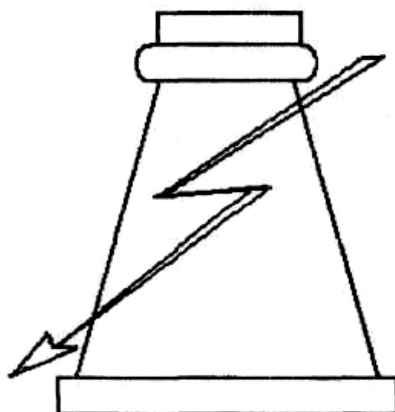
**В. Ф. РОЙ**

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

з дисципліни

# **ТЕХНІКА ВИСОКИХ НАПРУГ**

*(для студентів 4 курсу денної і 5 заочної форм навчання напряму підготовки 6.050701 – Електротехніка та електротехнології та слухачів другої вищої освіти спеціальності 7.05070103 – Електротехнічні системи електроспоживання)*



**Рой В. Ф.** Конспект лекцій з дисципліни «Техніка високих напруг» (для студентів 4 курсу денної і 5 заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.050701 – Електротехніка та електротехнології та слухачів другої вищої освіти спеціальності 7.05070103 – Електротехнічні системи електроспоживання) / В. Ф. Рой ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016. – 160 с.

Автор д-р фіз.-мат. наук, проф. В. Ф. Рой

Рецензент д-р техн. наук, проф. В. А. Малярєнко

Рекомендовано кафедрою електропостачання та електроспоживання міст, протокол № 3 від 9.03.2016 р.

## ЗМІСТ

ВСТУП. . . . .	6
1 ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ В ГАЗАХ. . . . .	11
1.1 Газові діелектрики в електроенергетиці . . . . .	12
1.2 Ударна іонізація. . . . .	16
2 ВИДИ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ. . . . .	23
2.1 Види електричних полів між електродами різної форми. . . . .	23
2.2 Регулювання електричних полів. . . . .	31
2.3 Регулювання електричних полів у внутрішньої ізоляції. . . . .	32
2.4 Регулювання полів конденсаторними обкладинками. . . . .	34
2.5 Використання напівпровідникових плівок. . . . .	35
3 КОРОНА НА ПРОВОДАХ ЛЕП. . . . .	36
3.1 Механізм виникнення коронного розряду. . . . .	36
3.2 Методи запобігання коронному розряду. . . . .	38
4 РОЗРЯДИ В ПОВІТРЯНИХ ПРОМІЖКАХ ПРИ ГРОЗОВИХ ПЕРЕНАПРУГАХ. . . . .	46
4.1 Параметри грозових імпульсів. . . . .	46
4.2 Електричні розряди в довгих повітряних проміжках. . . . .	48
4.3 Характеристика та параметри грозових перенапружень. . . . .	53
4.4 Характеристика грозової діяльності . . . . .	55
5 ЗАХИСТ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ВІД УДАРІВ БЛИСКАВКИ. . . . .	56
5.1 Ефективність захисту електрообладнання. . . . .	56
5.2 Зона захисту одиночного блискавковідводу. . . . .	59
5.3 Зона захисту подвійного стрижневого блискавковідводу. . . . .	61
5.4 Зона захисту тросових блискавковідводів. . . . .	64
5.5 Заземлення блискавковідводів. . . . .	65
6 РОЗРЯДИ ВЗДОВЖ ПОВЕРХНІ ТВЕРДИХ ІЗОЛЯТОРІВ. . . . .	69
6.1 Вплив поверхні твердого діелектрика на розвиток розряду. . . . .	69
6.2 Розряд по зволоженій та забрудненій поверхні ізоляторів. . . . .	72
6.3 Часткові дуги (розряди). . . . .	73
6.4 Вибір ізоляторів залежно від зовнішнього середовища. . . . .	75
6.5 Дуговий розряд. . . . .	76
7 РОЗРЯДИ В РІДКИХ ДІЕЛЕКТРИКАХ. . . . .	78
7.1 Фізична природа розряду в рідких діелектриках. . . . .	78
7.2 Комбінована ізоляція. . . . .	82

8 ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ. . . . .	83
8.1 Внутрішня та зовнішня ізоляція електрообладнання. . . . .	83
8.2 Основні властивості внутрішньої ізоляції. . . . .	84
8.3 Механізми пробою твердих діелектриків. . . . .	85
8.4 Ізоляція трансформаторів. . . . .	89
8.5 Конструкція ізоляції трансформаторів. . . . .	90
9 ПОЛЯРИЗАЦІЯ ДІЕЛЕКТРИКІВ. . . . .	92
9.1 Види поляризації діелектриків. . . . .	92
9.2 Схеми заміщення діелектрика. . . . .	93
10 МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ВНУТРІШНЬОЇ ІЗОЛЯЦІЇ. . . . .	96
10.1 Використання абсорбційних струмів для контролю ізоляції. . . . .	96
10.2 Контроль ізоляції підвищеною напругою. . . . .	99
10.3 Випробування і координація ізоляції за рівнем перенапруг. . . . .	100
10.4 Випробувальні трансформатори і методика контролю. . . . .	102
10.5 Контроль ізоляції за інтенсивністю часткових розрядів. . . . .	103
10.8 Контроль ізоляції по тангенсу кута діелектричних втрат. . . . .	104
11 ВИСОКОВОЛЬТНІ ІЗОЛЯТОРИ. . . . .	107
11.1 Класифікація ізоляторів . . . . .	107
11.2 Вводи високовольтні масло наповнені . . . . .	108
12 ВИДИ СТАРІННЯ ВНУТРІШНЬОЇ ІЗОЛЯЦІЇ. . . . .	109
12.1 Електричне старіння . . . . .	109
12.2 Старіння від механічних навантажень . . . . .	111
12.3 Вплив зволоження на процеси старіння . . . . .	111
12.4 Роль часткових розрядів у старінні ізоляції . . . . .	112
12.5 Теплове старіння ізоляції . . . . .	113
13 АПАРАТИ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ВІД ПЕРЕНАПРУГ. . . . .	114
13.1 Захисні пристрої (ПЗ). . . . .	116
13.2 Трубочасті розрядники (РТ). . . . .	117
13.3 Вентильні розрядники. . . . .	121
13.4 Обмежувач перенапруг нелінійний (ОПН). . . . .	122
13.5 Довгоіскрові розрядники (РДІ). . . . .	126
14 ХВИЛЬОВІ ПРОЦЕСИ В ЛЕП. . . . .	126
14.1 Рівняння хвильового процесу. . . . .	126
14.2 Преломлення і відбиття електромагнітних хвиль. . . . .	127
14.3 Імпульсна корона на проводах ЛЕП. . . . .	128
15 БЛИСКАВКОЗАХИСТ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ. . . . .	130
15.1 Інтенсивність грозової діяльності. . . . .	130
15.2 Грозостійкість ЛЕП без тросів. . . . .	132

15.3 Удар блискавки в землю поблизу ЛЕП. . . . .	134
15.4 Грозостійкість ЛЕП з тросами. . . . .	135
15.5 Визначення імовірності перекриття ізоляції. . . . .	139
6 ЗАХИСТ ПІДСТАНЦІЙ ВІД ПЕРЕНАПРУГ. . . . .	142
16.1 Захист підстанцій від ударів блискавки. . . . .	142
16.2 Захист підстанцій від набігаючих імпульсів перенапруг. . . . .	143
16.3 Визначення довжини захищеного підходу до підстанції. . . . .	147
16.4 Особливості захисту підстанцій різної номінальної напруги. . .	148
16.5 Ефективність захисту електрообладнання підстанцій. . . . .	149
16.6 Види комутаційних перенапруг . . . . .	151
16.7 Способи обмеження комутаційних перенапруг. . . . .	154
Предметний покажчик. . . . .	156
Список рекомендованої літератури. . . . .	159

## ВСТУП

Метою курсу «Техніка високих напруг» є вивчення теорії електродинамічних процесів, що відбуваються в електротехнічних матеріалах: газових, рідких, твердих та комбінованих діелектриках при дії на них високих напруг, сильних струмів та електромагнітних полів; явища іонізаційних процесів, механізмів виникнення різних форм розряду в міжелектродному проміжку в усіх його стадіях – від іскрового до дугового; особливості розвитку розряду по поверхні твердого діелектрика ізоляторів високої напруги, природи виникнення та способів протидії негативному впливу грозових і комутаційних перенапруг на робочі характеристики ізоляційних конструкцій високовольтного електрообладнання; робочі характеристики, конструкції та принцип дії сучасних апаратів захисту від перенапруг; координації ізоляції та сучасних інженерних методів профілактичного контролю й випробування ізоляційних конструкцій різних типів енергетичного електрообладнання.

Предметом вивчення дисципліни є вивчення основних механізмів електродинамічних процесів у діелектричних конструкціях високовольтного електрообладнання та сучасних інженерних методів розрахунку параметрів грозозахисних систем та заземлюючих пристроїв, принципів захисту підстанцій і ЛЕП від прямих ударів блискавки і набігаючих по лінії імпульсів перенапруг, забезпечення безаварійної роботи високовольтного електроенергетичного обладнання в умовах дії грозових та комутаційних перенапруг та негативного впливу факторів зовнішнього середовища. Саме тому дисципліна «ТВН» є базовою для усіх електроенергетичних і електротехнічних спеціальностей.

Мета курсу:

- вивчити електрофізичні процеси в ізоляції при нормальних та екстремальних умовах експлуатації;
- опанувати сучасні методики визначення електричної міцності ізоляційних конструкцій високої напруги;

– вивчити взаємозв'язок між електричними властивостями основних видів ізоляції, рівнями перенапруг, що впливають на неї, і характеристиками захисної апаратури;

– засвоїти основні методи й норми випробування різних типів ізоляції високовольтного електрообладнання;

– вивчити сучасні засоби боротьби з перенапругами у високовольтних електро мережах.

Основні поняття та визначення електрофізики високих напруг

*Середня фазна* напруга в мережі називається *номінальною*:  $U_{ном}$ .

*Найбільша допустима* напруга ( $U_{н.д.}$ ) лінії електропередач(ЛЕП) не повинна перевищувати:

ЛЕП-220 кВ —  $1,15 \cdot U_{ном}$ .

ЛЕП-330 кВ —  $1,1 \cdot U_{ном}$ .

ЛЕП-500-1150 кВ —  $1,05 \cdot U_{ном}$ .

Перевищення напруги понад найбільш допустиму називається *перенапругою*. Перенапруги поділяються на *внутрішні (ВП)* і *зовнішні, або грозові (ГП)*. Джерелом внутрішніх перенапруг є електрорушійні сили генераторів, енергія яких накопичується в реактивних елементах мережі та електрообладнання і проявляється у вигляді коливальних резонансних процесів електричної або магнітної енергії при планових або аварійних комутаціях електрообладнання. Величина і характер внутрішніх перенапруг залежить від виду комутації, режиму та характеристик електричної мережі, типу електрообладнання, що комутується, – тому природа таких перенапруг дуже різноманітна і має статистичний характер.

*Грозові перенапруги* виникають завдяки розряду блискавки в струмоведучі або заземлені частини електроустановок, внаслідок чого на них формуються імпульси перенапруги. Величина і характер грозових перенапруг залежать від інтенсивності грозових процесів і також є статистичною величиною. Відношення амплітуди перенапруги  $U_{пер}$  до амплітуди найбільшої

фазної робочої напруги  $U_{нд}$  називають *кратністю* перенапруги і характеризують відповідним коефіцієнтом  $k_{пер} = U_{пер} / U_{н.д.}$ .

Відмінність ГП від ВП полягає в тому, що ГП впливають на ізоляцію короткочасно (десятки мкс.) і мають *імпульсний* характер, ВП — впливають на ізоляцію досить тривалий час (десятки мс.) і мають *періодичний* характер. Кратність і тривалість перенапруг суттєво залежить від режиму заземлення нейтралі системи. У системах з ізольованою нейтраллю при КЗ на землю напруга на двох фазах підвищується до лінійної. При дуговому замиканні перенапруга може досягати величини  $\sim 4 \cdot U_{\phi}$ .

Оскільки при цьому струм КЗ не досягає значних величин, то не відбувається відключення пошкодженої ділянки мережі і перенапруга може існувати тривалий час. Тому необхідно знижувати величину перенапруги й посилювати ізоляцію, що економічно виправдано лише для мережі 5 – 35 кВ, де часті однофазні замикання на землю не призводять до аварійних відключень електромережі. Рівень ізоляції мережі 5 – 35 кВ визначається виключно вимогами грозостійкості, причому показники грозостійкості ЛЕП із збільшенням номінальної робочої напруги покращуються. У той же час внутрішні (комутаційні) перенапруги відіграють вирішальну роль при визначенні рівня ізоляції системи в цілому.

У мережах з ефективно заземленою нейтраллю однофазне замикання на землю супроводжується протіканням струму КЗ та аварійними відключеннями мережі, тому напруга на непошкоджених фазах зростає не більш ніж до  $1,4 U_p$  і автоматичне повторне включення (АПВ), як правило, поновлює нормальну роботу мережі.

Найбільш небезпечними за своїми наслідками є грозові, або атмосферні перенапруги, пов'язані з ударом блискавки в електрообладнання або безпосередньо в ЛЕП чи поблизу неї. Перенапруги, що виникають при цьому, розповсюджуються по мережі зі швидкістю, близькою до швидкості світла, діючи на ізоляцію ліній та усього обладнання. Тривалість деяких грозових імпульсів перенапруг складає одиниці мікросекунд, але амплітуда їх може



сягати тисяч кілоампер, що надзвичайно небезпечно для будь-якого типу ізоляції. Тому існує необхідність захищати мережі від прямих ударів блискавки й обмежувати величину (амплітуду) грозових перенапруг до безпечних значень. Таким чином, для забезпечення безаварійної роботи електрообладнання ізоляція електроустановок повинна витримувати багатократні дії як атмосферних, так і внутрішніх видів перенапруг, тобто мати відповідний рівень електричної міцності.

Обмеження амплітуди діючих перенапруг здійснюється за допомогою захисних апаратів - розрядників та обмежувачів перенапруг нелінійних (ОПН). Узгодження величини діючих перенапруг із робочими характеристиками захисної апаратури та електричною міцністю ізоляції, що забезпечує надійну роботу і найбільшу ефективність електроустановки, – це головне техніко-економічне завдання при проектуванні та розрахунку електроустановки, назване *координацією ізоляції*. Теоретично й практично можливе створення електроенергетичної установки з дуже міцною ізоляцією і, відповідно, малою імовірністю виникнення аварійних ситуацій, однак це призведе до різкого збільшення її габаритів, маси і вартості, що з техніко-економічних міркувань є недоцільним. З одного боку, рівень ізоляції повинен бути достатньо високим для забезпечення необхідної надійності системи, а з другого, він повинен бути економічно обґрунтованим. Тому головним критерієм вибору рівня ізоляції є техніко-економічна ефективність, що визначається на основі врахування статистичних характеристик частоти виникнення перенапруг та імовірності величини їх параметрів. Таким чином, забезпечення надійної роботи електрообладнання з урахуванням техніко-економічних показників, включаючи погодження величини діючих перенапруг із захисними характеристиками обмежувачів перенапруг, – є головним завданням розробників систем електроенергетики.

Ізоляція електроустановок поділяється на два види: *зовнішню* і *внутрішню*. Зовнішня ізоляція складається з повітряних проміжків між струмоведучими частинами системи електропостачання, а також зовнішніх

поверхонь ізоляторів, до яких кріпляться струмоведучі шини, проміжки між контактами роз'єднувачів та ін. Внутрішня ізоляція – це, насамперед, ізоляція обмоток трансформаторів, електричних машин, кабелів та ін. Якщо електрична міцність *зовнішньої* ізоляції залежить від впливу зовнішніх факторів: температури, тиску, вологості, забруднення, то характеристики *внутрішньої* ізоляції практично не залежать від атмосферних впливів. Але в процесі експлуатації на ізоляцію, крім сильних електромагнітних полів, діють також підвищена температура, механічні навантаження (статичні або динамічні), внаслідок чого відбуваються процеси деградації (старіння) ізоляції, пов'язані зі структурними змінами матеріалу завдяки протіканню в них фізико-хімічних процесів, що призводять до погіршення їх функціональних характеристик, насамперед, електричної міцності. Тому важливим завданням обслуговуючого персоналу електромереж є своєчасний контроль стану ізоляційних конструкцій та елементів устаткування та їх своєчасне поновлення або заміна. З цією метою необхідно проводити періодичне комплексне випробування та аналіз стану ізоляції на спеціалізованому обладнанні.

За агрегатним станом ізоляція електроустановок поділяється на тверду, рідку та газоподібну. Комбінація з двох видів ізоляції (наприклад, твердої і рідкої) має назву *комбінованої* (це маслобар'єрна і паперово-масляна ізоляція).

Основними вимогами до всіх видів ізоляції є найбільша електрична міцність та спроможність протистояти впливу усіх зовнішніх факторів при мінімальних конструктивних габаритах і вартості, екологічність, відвід тепла. Важливою характеристикою зовнішньої (газової) ізоляції є поновлюваність її електричної міцності після пробою. Рідка ізоляція після пробою також поновлює електричні властивості, але не в повному обсязі внаслідок забруднення її продуктами горіння дуги, тому її стан періодично контролюють у процесі експлуатації, не допускаючи його погіршення до критичної величини.

Внутрішня (тверда) ізоляція, на відміну від зовнішньої, є не поновлювальною, тобто після пробою в ній відбуваються незворотні фізико-хімічні процеси, в результаті чого вона остаточно втрачає свої первинні

діелектричні властивості, що може призвести до аварійного відключення електропостачання. На ізоляцію у процесі експлуатації тривалий час діє робоча напруга, яка може коливатись у встановлених межах  $\pm 10-15\%$ , тому ізоляційні конструкції повинні протягом гарантованого строку служби безвідмовно функціонувати при дії цієї напруги.

### **Запитання для самоконтролю**

1. Які мета та завдання курсу ТВН?
2. Як класифікується ізоляція електрообладнання?
3. Що таке найбільша допустима і номінальна напруга?
4. Поняття про перенапруги, їх види, характеристика та джерела.
5. Сформулюйте поняття «координація ізоляції».
6. Основні етапи і перспективи розвитку ТВН?

## **1 ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ В ГАЗАХ**

### **1.1 Газові діелектрики в електроенергетиці**

Гази в якості діелектриків широко використовуються в різних електроізоляційних конструкціях. Це насамперед повітря, елегаз ( $\text{SF}_6$ ), азот. До них слід віднести також вакуум. Перевагами газової ізоляції є:

- хороші електроізоляційні властивості;
- стабільність робочих характеристик у процесі експлуатації;
- простота конструкцій електрообладнання з газовою ізоляцією;
- зниження маси і габаритів таких електроустановок;
- відносна пожежна безпека при роботі.

Недоліками повітря як ізоляції є утворення озону при електричних розрядах, що призводить до посилення корозії металевих частин електрообладнання, а також залежність його електричної міцності від атмосферних факторів: вологості, температури, тиску, забруднення.

Зокрема, недоліками елегазу є обмеження застосування через його скраплення при нормальному тиску і температурі  $-45^{\circ}\text{C}$ . Для зниження робочої температури елегазу до нього додають 6% азоту, що розширює робочий діапазон елегазової ізоляції до  $-60^{\circ}\text{C}$  (рис. 1.1).

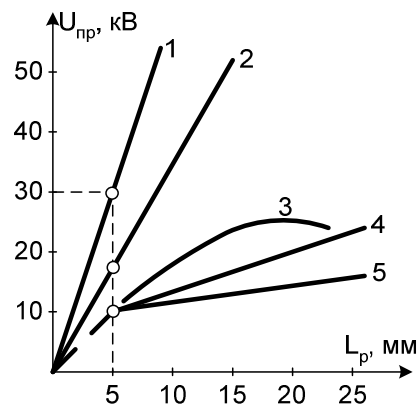


Рисунок 1.1 – Залежність електричної міцності ізоляції від відстані між електродами:

- 1 – повітря при тиску  $p = 2,8 \text{ МПа}$ ; 2 – елегаз при тиску  $p = 0,7 \text{ МПа}$ ;  
 3 – трансформаторне масло; 4 – елегаз при тиску  $p = 100 \text{ кПа}$ ; 5 – повітря при тиску  $p = 100 \text{ кПа}$

Атоми газу в нормальному стані є нейтрально зарядженими частинками і знаходяться в рівномірному хаотичному тепловому русі, зіштовхуючись між собою і витрачаючи кінетичну енергію. Структура атома згідно з планетарною моделлю складається з позитивно зарядженого ядра (протона), навколо якого на стаціонарних орбітах, що відповідають певним енергетичним рівням, обертається відповідна кількість негативно заряджених електронів, які компенсують позитивний заряд ядра, внаслідок чого атом в цілому залишається нейтральним.

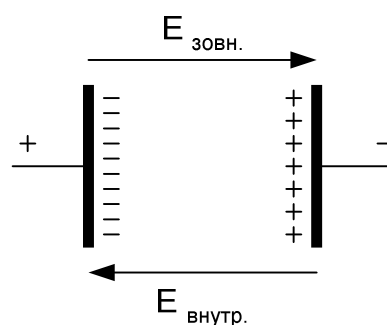


Рисунок 1.2 – Іонізація атомів газу під дією зовнішнього електричного поля

У сильному електричному полі  $E$  вільні електрони, що мають заряд  $e$  (деяка кількість яких завдяки природним іонізаторам (сонячне випромінювання, радіаційний фон землі та ін. завжди присутня в міжелектродному проміжку), рухаючись на шляху  $x$ , набувають кінетичної енергії  $W_e = e \cdot E \cdot x$ . При цьому якщо енергія електрона  $W_e$  більша за енергію зв'язку електрона з атомом, яка має назву енергії іонізації  $W_i$ , то при зіткненні такого електрона з атомом від нього відривається електрон внаслідок чого утворюються дві заряджені частинки: позитивно заряджений іон і *вільний* електрон. Якщо ж енергія  $W_e < W_i$ , то відбувається *збудження* атома, в результаті чого його електрони переходять на більш високі орбіти, які відповідають більшим енергіям атома.

Крім кінетичної енергії іонізація атомів може відбуватися під впливом теплової енергії (термоіонізація) та енергії випромінювання (фотоіонізація). Деякі атоми газів (хлор, фтор, кисень), які мають вільні місця на зовнішніх орбітах, можуть захоплювати вільні електрони і утворювати негативні іони. Такі гази називають *електронегативними*, і вони є хорошими діелектриками, оскільки захоплюють найбільш активних носіїв заряду якими є електрони. Атоми, які навпаки легко від'єднують зі своєї зовнішньої орбіти електрони, перетворюючись в позитивно заряджені іони, – такі гази (азот, інертні гази) називають електропозитивними.

Процес ударної іонізації призводить до різкого збільшення числа електронів  $n$  в міжелектродному проміжку за експоненціальним законом і утворення *лавини електронів*:  $n = n_0 e^{\int_0^x \alpha dx}$ , тут  $n_0$  – число первинних вільних електронів,  $\alpha$  – коефіцієнт ударної іонізації, який дорівнює відношенню числа іонізованих атомів  $N_i$  до числа зіткнень електронів з атомами  $N_z$  на шляху 1 см в напрямку електричного поля  $E$ :  $\alpha = N_i / N_z$ .

Якщо на одиниці довжини шляху переміщення відбувається  $Z$  зіткнень електрона з атомами, то середня довжина вільного пробігу  $\lambda$  складе:  $\lambda = 1/Z$ .

Очевидно, вона залежить від відносної щільності газу  $\delta$ :  $\delta = \frac{p \cdot T_0}{p_0 \cdot T}$ : таким

чином,  $\lambda$  зворотно пропорційна  $\delta$ . Тиск  $p_0$  і температура  $T_0$  – умовно прийняті за нормальні ( $p_0 = 760$  мм. рт. ст. =  $101 \cdot 10^3$  Па,  $T_0 = 293$  К =  $20$  °С),  $p$  і  $T$  – дійсні на даний час параметри газу. При нормальних умовах  $\delta = 1$ , ( $p = p_0$ ,  $T = T_0$ );  
 $\delta = 2.93 \cdot 10^{-3} \frac{P}{T}$ , ( $p$  – Па,  $T$  – К).

При розгляді процесів у газі достатньо використовувати спрощену (планетарну) модель атома, не враховуючі його *хвильових* властивостей. У нормальному стані всі електрони знаходяться на стаціонарних орбітах, що відповідає мінімальному енергетичному стану атома.

В електричному полі напруженістю  $E$  на заряджені частинки газу діє сила:  $F = e \cdot E$ , ( $e$  – заряд частинки). Імпульс зарядженої частинки в напрямку електричного поля дорівнює:  $m \cdot V_0$  ( $m$  – маса частинки,  $V_0$  – швидкість дрейфу). Нехай  $\nu$  – частота зіткнень частинки з атомом, тоді *швидкість втрати* нею імпульсу дорівнює:  $m \cdot V_0 \cdot \nu$ . Ця швидкість, відповідно до другого закону Ньютона, компенсується дією на частинку сили, тому:  $m \cdot V_0 \cdot \nu = e \cdot E$ . Середній час між двома зіткненнями частинки:  $\tau = \lambda / V_{\text{сер.}}$  ( $V_{\text{сер.}}$  – середнє арифметичне значення швидкості теплового руху). Звідки середня швидкість теплового руху  $V_0$  виявляється пропорційна напруженості електричного поля  $E$

$$V_0 = \frac{e}{m \cdot \nu} E = \frac{e\tau}{m} E = \frac{e\lambda}{mV_{\text{сер.}}} E = K \cdot E. \quad (1.1)$$

Концентрація частинок газу визначається як:  $N = \frac{P}{kT}$ ,

( $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К =  $8,62 \cdot 10^{-5}$  еВ/К – постійна Больцмана).

Коефіцієнт пропорційності  $\mu = V_0/E$  називається *рухливістю* — це швидкість дрейфу частки в електричному полі з напруженістю  $E = 1$  В/см. Враховуючі, що середня довжина вільного пробігу частинок  $\lambda_{\text{ср}}$  зворотно пропорційна тиску газу  $p$ , то при постійній температурі з урахуванням (1.1) отримаємо:  $\mu \cdot p = \text{const}$ .

Рухливість електронів  $\mu_e$  на відміну від рухливості іонів  $\mu_i$  залежить від напруженості електричного поля. Припускаючи, що кінетична енергія

електронів та іонів в електричному полі рівні, тоді співвідношення їх рухливостей  $\mu$  буде

$$V_e/V_i = \mu_e/\mu_i = \sqrt{m_i/m_e} \quad (1.2)$$

Оскільки маса електрона та іона:  $m_e=9,1 \cdot 10^{-28}$ Г,  $m_i=1,7 \cdot 10^{-24}$ Г, то для повітря, основною складовою якого є азот (атомна маса 14):  $\mu_e / \mu_i = 227$ .

Зокрема, рухливість іонів у повітрі при нормальних умовах складає:  $\mu_i = 2$  см<sup>2</sup>/В·с, а електронів –  $\mu_e = 400$  см<sup>2</sup>/В·с.

Орбіта електрона характеризується певним рівнем потенційної енергії. У нормальних умовах усі електрони перебувають на орбітах, що відповідають мінімальній потенційній енергії атома. Перехід електрона на вищу орбіту можливий при збільшенні енергії атома на *дискретну* величину, що дорівнює різниці потенціалів енергії двох орбіт. Енергія атома стрибком змінюється на величину, вимірювану в електрон-вольтах:  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Вт·с (Дж). Перехід електрона на більш віддалені орбіти означає збільшення енергії і називається *збудженням атома*, в якому він перебуває  $\approx 10^{-8}$ с. Повернення атома в нормальний стан супроводжується виділенням надлишкової енергії, яка випромінюється у вигляді квантів світла – фотонів з енергією  $\varepsilon = h\nu$  (тут  $h$  – постійна Планка,  $\nu$  – частота). При цьому спостерігається світіння газу. Звичайно число збуджених частинок значно більше числа іонізованих. Якщо поглинена енергія перевищує енергію зв'язку електрона з ядром, то електрон виходить з орбіти і стає *вільним*.

При тепловому русі також відбувається переміщення частинок під дією *градієнта* концентрації в ділянку з меншою концентрацією. Цей процес називається *дифузією*. При градієнті концентрації частинок  $dN/dx$  уздовж осі  $x$  дифузія описується рівнянням потоку дифузії:  $j = -D \frac{dN}{dx}$ , тобто число частинок  $j$ , що проходять за 1 с. через одиницю площі, пропорційне градієнту концентрації та коефіцієнту дифузії:  $D = \lambda V/3$ . Коефіцієнт дифузії залежить від маси частинок, зокрема, для електронів у повітрі він складає  $12,7$  см<sup>2</sup>/с, а іонів –  $0,05$  см<sup>2</sup>/с.

Зіткнення електронів з іонами призводить до відновлення нейтрального стану атома і поновлення діелектричних властивостей проміжку. Цей процес характеризується коефіцієнтом прилипання  $\eta$  – це число захоплених іонами електронів на шляху 1 см.

Газ, в якому більшість атомів іонізована, називається *плазмою*. Плазма, на відміну від газу, має велику електропровідність і спроможна відбивати електромагнітні хвилі, тому її вважають четвертим агрегатним станом речовини.

## 1.2 Ударна іонізація

Вільний електрон у сильному електричному полі  $E$  набуває кінетичну енергію  $W_e$  і, якщо ця енергія більша за енергію іонізації  $W_e > W_i$ , то при зіткненні електрона з нейтральним атомом відбувається передача цієї енергії атому, внаслідок чого його електрони переходять на більш віддалені орбіти, а електрони зовнішньої орбіти відриваються від атома. Цей процес називають *ударною іонізацією*. Відстань, на якій електрон накопичує достатню енергію для іонізації:

$$x = \frac{W_i}{eE} = \frac{U_i}{E}. \quad (1.3)$$

Імовірність того, що електрон пролетить шлях  $x$  без зіткнень, дорівнює

$$P(x_n) = \exp\left(-\frac{x_n}{\lambda}\right), \quad (1.4)$$

тобто це і є імовірність іонізації.

Ударна іонізація характеризується коефіцієнтом  $\alpha$ , що дорівнює числу іонізацій, зроблених електроном на шляху в 1 см в напрямку електричного поля  $E$ . Оскільки  $Z$  – середнє число зіткнень на одиниці шляху  $Z = 1/\lambda$ , то число

$$\text{іонізуючих зіткнень} \quad \alpha = Z \cdot P(x_n) = \frac{1}{\lambda} \cdot e^{-\frac{x_n}{\lambda}} = \frac{1}{\lambda} \cdot e^{-\frac{W_n}{\lambda \cdot e \cdot E}}, \quad (1.5)$$



або з урахуванням впливу густини газу  $\delta$  і температури  $T$ :

$$\alpha = \frac{\delta \cdot W_n}{\lambda \cdot e} \cdot e^{\frac{-\delta W_n}{\lambda \cdot e \cdot E}} = A \cdot \delta \cdot e^{\frac{-B\delta}{E}} \quad (1.6)$$

Ця формула не враховує, що електрон при зіткненні втрачає не всю енергію і атом може бути додатково збуджений від попередніх зіткнень. Тому коефіцієнти  $A$  і  $B$  для кожного газу визначають експериментально.

Існує поняття *граничної* напруженості електричного поля, що обумовлює процес іонізації повітря:  $E_i = 24,5 \cdot \delta$  (при нормальних умовах  $\delta = 1$ , тоді  $E_i = 24,5$  кВ/см).

Якщо початкове число електронів  $n$  забезпечує на ділянці  $dx$  збільшення кількості електронів  $dn$ , тоді

$$dn = n \cdot \alpha \cdot dx, \quad (1.7)$$

де  $n = e^{\int \alpha dx}$  – це свідчить, що число електронів і іонізацій зростає за експоненціальним законом, утворюючи лавинний розряд. Процес зростання числа електронів, що рухаються в електричному полі в напрямку до анода, називають *лавиною* електронів. Теорію лавинного розряду в газі створив Дж. Таунсенд.

При розвитку лавини електронів поряд з ними утворюються *позитивні* іони, які через значно більшу ( $10^4$  раз) масу рухаються набагато повільніше. Знаходячись у полі  $E$ , вони спотворюють його, що впливає на рух електронів. Позитивні іони можуть бути ще раз іонізовані, в результаті чого утворюються дво- або тризарядні іони і відповідна кількість електронів. Завдяки існуванню так званого метастабільного стану атомів або молекул, час існування якого –  $10^{-4}$  с, можливе явище *сходинкової* іонізації, наприклад, за рахунок декількох послідовних зіткнень електронів з атомом, особиста енергія кожного з яких менша за енергію іонізації.

При своєму розвитку лавина електронів розширюється через дифузію і електростатичне відштовхування частинок. Якщо вважати, що лавина має форму кулі, то зміну її дифузійного радіуса розраховують за формулою

$$r = \sqrt{6 \cdot D \cdot t}, \quad (1.8)$$

де  $D$  – коефіцієнт дифузії (Ейнштейн, Таунсенд).

Оскільки маса електрона  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-28}$  г., а маса протона  $m_n = 1,67 \cdot 10^{-24}$  г., то для повітря, що складається, в основному з молекулярного азоту,  $m = 14m_e$ . Із рівняння (1.1) випливає, що рухливість іонів дорівнює

$$\mu_i = \frac{e\lambda}{m_i V}. \quad (1.9)$$

Відношення коефіцієнта дифузії до рухливості іонів складає:

$$\frac{D_i}{\mu_i} = \frac{\lambda V m_i V}{3e\lambda} = \frac{m_i V^2}{3e} \quad (1.10)$$

Враховуючи кінетичну енергію теплового руху іонів:

$$\frac{m_i V^2}{2} = \frac{3}{2} kT, \quad (1.11)$$

остаточно отримаємо (співвідношення Ейнштейна):

$$\frac{D_i}{\mu_i} = \frac{kT}{e}. \quad (1.12)$$

Звідки виходить, що електрони швидше дифундують в ділянку менших концентрацій, ніж іони. Одночасна дифузія електронів і іонів має назву *амбіполярної* дифузії. Коефіцієнт амбіполярної дифузії значно менший за коефіцієнта дифузії електронів. Оскільки рухливість іонів  $\mu_i = 2 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ , а електронів –  $\mu_e = 400 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ , то

$$\frac{\mu_e}{\mu_i} = \sqrt{\frac{1840 \cdot 2 \cdot 14 \cdot m_e}{m_e}} = 227 \quad (1.13)$$

Тобто рухливість електронів на 2 порядки більша за рухливість іонів.

Визначимо зміну радіуса лавини через електростатичне відштовхування електронів. Напруженість електричного поля на зовнішній границі лавини, що має форму кулі з радіусом  $r$ , дорівнює

$$E_n = \frac{e \cdot n}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \quad (1.14)$$

де  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – електрична постійна.

Швидкість розширення лавини під дією поля  $E_n$

$$\frac{dr}{dt} = \mu_e \cdot E_n = \frac{\mu_e \cdot e \cdot n}{4\pi\epsilon_0 r^2}. \quad (1.15)$$

Оскільки зсув центру лавини в зовнішньому полі  $E_0$  за термін  $dt$  дорівнює  $dx = \mu_e \cdot E_0 \cdot dt$ , а збільшення за цей період числа електронів  $dn = \alpha \cdot n \cdot dx$ , то

$$r^2 \cdot dr = \frac{e \cdot dn}{4\pi\epsilon_0 \cdot \alpha \cdot E_0}. \quad (1.16)$$

Інтегруючи, одержимо аналітичний вираз для електростатичного радіуса лавини:

$$r = \left( \frac{3 \cdot e \cdot n}{4\pi\epsilon_0 \cdot \alpha \cdot E_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1.17)$$

Через різну рухливість за час прямування лавини до анода, іони майже залишаються на місці, що дозволяє визначити їх концентрацію уздовж шляху лавини: частота іонізації позитивними іонами в  $10^5$  разів менше, ніж електронами. Але бомбардуючи катод, вони вибивають з нього електрони. Це явище має назву – *вторинна електронна емісія*. Вихід електронів з катоду під дією сильного електричного поля називається *автоелектронною емісією*.

Робота виходу електрона з металу (Fe,Cu):  $W_{\text{вих}} = 4,5$  eV. Оскільки в металах електрони зовнішніх орбіт знаходяться у вільному стані, утворюючи так званий електронний газ, то під дією високої температури вони також можуть вийти з металу. Це явище має назву – *термоелектронна емісія*.

Якщо в лавині на відстані  $x$  від катода є  $n$  електронів, то на шляху  $dx$  вони створять  $\alpha \cdot n \cdot dx$  позитивних іонів в об'ємі  $\pi r^2 dx$ . Тому концентрація позитивних іонів у лавині

$$N_+ = \frac{\alpha \cdot n}{\pi \cdot r^2} = \frac{\alpha \cdot e^{\alpha x}}{\pi \cdot r^2}. \quad (1.18)$$

Паралельно з процесами іонізації відбуваються зворотні процеси, які полягають в захопленні позитивними іонами вільних електронів і утворенні нейтральних атомів. Такі явища називаються *рекомбінацією* і характеризуються відповідним коефіцієнтом  $\eta$ . Тому вводять поняття *ефективного* коефіцієнта ударної іонізації:  $\alpha_{ef} = \alpha - \eta$ , який і визначає інтенсивність розвитку лавини електронів.

Крім зовнішнього електричного поля існують також природні іонізатори: космічні промені, радіоактивне випромінювання землі, ультрафіолетове випромінювання Сонця. Якщо енергія кванта випромінювання (фотона)  $\epsilon = h\nu \geq W_i$ , то відбувається явище *фотоіонізації* на катоді і в об'ємі. Це можливо в сильних електричних полях, коли відбувається збудження іонів, які випромінюють потужні фотони з енергією, що перевищує енергію іонізації атома. При температурі порядку  $5000^\circ\text{C}$  можлива також *термоіонізація*.

Якщо при усуненні іонізатора розряд припиняється, такий розряд є *несамостійним*. Для того, аби розряд став самостійним, необхідно, щоб після проходження первинної лавини з'явився хоча б один вторинний електрон, здатний створити нову лавину. Така нова лавина називається *вторинною*. Число *вторинних* електронів пропорційне числу первинних  $n$  і визначається здатністю міжелектродного проміжку утворювати вторинні лавини, що характеризується *коефіцієнтом вторинної іонізації*  $\gamma$ . Цей коефіцієнт визначає внесок кожного первинного електрона у створення вторинного в процесі утворенні вторинної лавини. Якщо в лавині  $n$  електронів, то на шляху  $dx$  кожний з них зробить  $\alpha \cdot dx$  іонізацій і збільшить число електронів на  $dn = \alpha \cdot n \cdot dx$ .

Розділивши змінні і проінтегрувавши, одержимо

$$n = n_0 \exp\left(\int_0^x \alpha \cdot dx\right). \quad (1.19)$$

Для однорідного поля  $\alpha$  не залежить від  $x$ , тоді:  $n = \exp(\alpha \cdot L)$ , тут  $L$  – відстань між електродами.

Таким чином, умова  $\gamma \cdot e^{\int_0^x \alpha dx} \geq 1$  – є необхідною умовою існування самостійного розряду в загальному вигляді.

З огляду на те, що  $n = e^{\int_0^x \alpha dx}$ , то для однорідного поля ця умова набуває вигляду:

$$\gamma \cdot n \geq 1. \quad (1.20)$$

Для неоднорідного поля

$$\int_0^x \alpha dx = \ln \frac{1}{\gamma} \approx const. \quad (1.21)$$

Отже для виконання умови самостійного розряду необхідно, щоб число іонізацій, здійснюваних одним електроном, було не менше деякої визначеної для даного середовища величини. Для повітря при атмосферному тиску ця константа дорівнює  $\approx 8 \div 20$ . Оскільки кінетична енергія електрону  $W_e$  в електричному полі залежить від довжини вільного пробігу:  $W_e \sim x$ , якій, в свою чергу, залежить від тиску газу  $p$ , визначимо величину розрядної напруги міжелектродного проміжку від цього параметру. Приймаючи для однорідного поля:  $\alpha L = const = K$ , і  $E = U/L$ , отримаємо:

$$U_p = \frac{B(pL)}{\ln\left\{\frac{A(pL)}{K}\right\}} \quad (1.22)$$

Це рівняння є аналітичним виглядом *закону Пашена*, який встановлює залежність величини розрядної напруги від тиску газу  $p$  і відстані між електродами  $L$  (рис. 1.3).

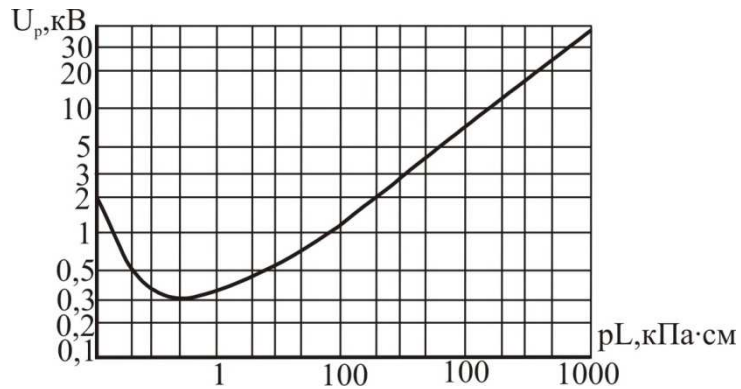


Рисунок 1.3 – Крива Пашена для повітряного проміжку з однорідним полем

Закон Пашена стверджує, що при незмінній температурі розрядна напруга газового проміжку з однорідним полем є прямо пропорційна добутку тиску  $p$  на відстань  $L$  між електродами. Якщо знизити тиск газу (при  $L = \text{const}$ ), відповідно знижується розрядна напруга, що обумовлено скороченням числа зіткнень електронів з атомами. При збільшенні тиску розрядна напруга зростає за рахунок зменшення імовірності іонізацій атомів газу завдяки зменшенню кінетичної енергії електронів  $W_k = e \cdot E \cdot x$  (зменшується довжина вільного пробігу  $x$ ). При дуже великих тисках спостерігається відхилення від закону Пашена у вигляді зниження розрядних напруг, що обумовлене місцевими підсиленнями напруженості електричного поля на поверхні електродів завдяки їх мікрорельєфу. При низькому тиску експериментальні значення розрядної напруги також нижче розрахованих, що пов'язано з зміною механізму розряду завдяки тому, що основну роль починає відігравати автоелектронна емісія з електродів. Для розрахунку величини розрядної напруги повітряного проміжку з однорідним полем, прийнявши для умови самостійного розряду:  $\alpha \cdot L = K = 8,2$ , використовують зручну формулу:

$$U_p = 24,58L + 6,4 \sqrt{\delta L} . \quad (1.23)$$

Величина розрядної напруги в повітряному проміжку  $L=1\text{см}$  при нормальних атмосферних умовах ( $T=24^\circ\text{C}$ ,  $p=760\text{ мм. рт. ст.}$ ) складає  $30,9\text{ кВ/см}$ , а при збільшенні проміжку –  $E_p$  наближається до  $24,5\text{ кВ/см}$ .

## Запитання для самоконтролю

1. Назвіть основні переваги й недоліки газової ізоляції.
2. Як впливає щільність повітря на розрядну напругу?
3. Поясніть фізичну суть процесу іонізації, та її різновиди.
4. Поясніть умови іонізації в об'ємі газу.
5. Сформулюйте основні положення теорії лавинного розряду.
6. Дайте визначення коефіцієнта ударної іонізації.
7. Сформулюйте закон Пашена, і його практичне значення.
8. Сформулюйте умови виникнення самостійного розряду.
9. Поясніть суть механізму вторинної електронної емісії.
10. Що таке рекомбінація, які її наслідки для міцності ізоляції?

## 2 ВИДИ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ

### 2.1 Види електричних полів між електродами різної форми

Залежно від форми пари електродів, що утворюють електричне поле, густина силових ліній поля (напруженість) може бути різною. Якщо поле утворене протяжними електродами і відстань між ними порівняна з їхніми розмірами, то напруженість поля в кожній ділянці проміжку між електродами однакова і величина коефіцієнта неоднорідності, який характеризує ступінь рівномірності напруженості ( $K_n = \frac{E_{max}}{E_{cp}} \leq 4$ ) не перевищує 4, то таке поле називають *квазіоднорідним* (рис. 2.1).

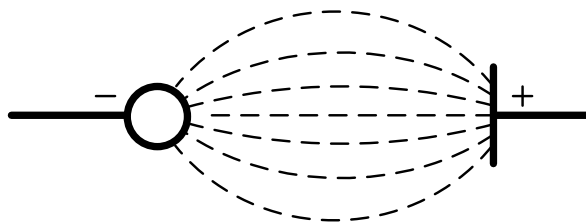


Рисунок 2.1 – Приклад квазіоднорідного електричного поля

Пари електродів, що утворять однорідне поле, наступні:

- площина – площина;
- куля – куля (при  $D \geq L$ ), рисунок 2.2;
- куля – площина.

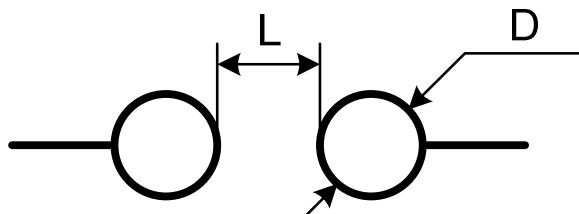


Рисунок 2.2 – Пара електродів: куля – куля

Наступні пари електродів утворюють *різко неоднорідне* поле:

- стрижень – стрижень;
- стрижень – площина;
- куля – площина (при  $D < L$ ).

Електричні поля також бувають *симетричними* (якщо електроди однакової форми) або *несиметричними* (якщо вони різні). У полях з центральною або осовою симетрією вектор напруженості поля  $E$  постійний і спрямований по нормалі до поверхні  $S$  електродів. Для такого поля рівняння Гаусса має вигляд

$$E \cdot S = (1 / \epsilon) \cdot q. \quad (2.1)$$

Оскільки для кулі поверхня  $S = 4 \pi \cdot r^2$ , то напруженість поля на відстані  $r$  від центру:

$$E = q / \epsilon \cdot 4 \pi r^2. \quad (2.2)$$

а для циліндра:

$$E = q / \epsilon \cdot 2 \pi r. \quad (2.3)$$

Площина електродів є *еквіпотенційною* поверхнею. Напруженість електричного поля  $E$  на еквіпотенційній поверхні максимальна в місцях найбільшої кривизни  $k$  цієї поверхні. Найбільшу кривизну мають краї електродів, тому там найбільша концентрація зарядів і, відповідно,



напруженість поля. Це явище називають *краєвим (граничним) ефектом*. Залежність напруженості електричного поля від кривизни еквіпотенційної поверхні визначається формулою

$$dE/E = k \cdot dn, \quad (2.4)$$

або, інтегруючи це рівняння вздовж силової лінії поля:

$$E_o = E_s \cdot e^{\int_u^i k dn} \quad E_o = E_s \cdot e^{\int_o^s k dn}, \quad (2.5)$$

тут  $E_o$ ,  $E_s$  – напруженість поля в точці «o» на поверхні електрода і в точці «s» уздовж силової лінії. У високовольтних конструкціях максимально знижують кривизну електродів для зменшення напруженості електричного поля в ізоляції. Це називають *регулюванням* електричних полів. Для надійної роботи ізоляційних конструкцій необхідно, щоб максимальна напруженість електричного поля не перевищувала допустимого значення:  $E_{max} \leq E_{дон}$ . Запишемо  $E_{max}$  через коефіцієнт неоднорідності  $\kappa_n$  і середню напруженість поля:  $E_{cp} = U/d$ , де  $U$  – робоча напруга,  $d$  – товщина ізоляції, тоді отримаємо

$$(U/d) \cdot \kappa_n \leq E_{дон}, \text{ або: } d \geq (U/E_{дон}) \cdot \kappa_n, \quad (2.6)$$

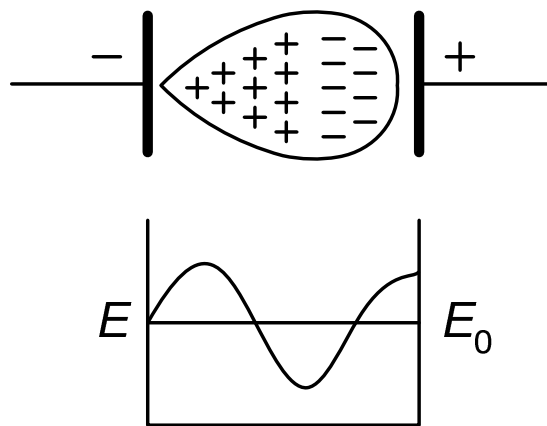
звідки випливає, що товщина ізоляції пропорційна неоднорідності електричного поля і мінімальна при однорідному полі.

*Лавинна теорія розряду* Таунсенда, не пояснює утворення вузького каналу *стрімерного* розряду, оскільки вона описує безперервний суцільний розряд, що інтерпретується рівняннями стаціонарного процесу. Розвитком теорії Таунсенда є *стрімерна теорія* Ретера, Міка і Льоба, яка наголошує, що у процесі розвитку лавини збільшується число електронів і іонів, напруженість електричного поля на фронті лавини зростає, а в задній частині знижується так, що стає неможлива ударна іонізація. Відсталі електрони, що знаходяться у хвості лавини, разом з іонами утворюють *плазму* і дають початок виникненню стрімерного каналу. Характерною рисою *стрімера* є наявність надлишкового заряду на його передньому кінці, що створює місцеве посилення електричного поля і забезпечує безупинне подовження плазмового каналу.

Критерієм переходу лавини в стример є сумірність *напруженості електричного поля*, створюваного лавиною електронів або іонами в її сліді, з *напруженістю зовнішнього електричного поля  $E$* .

Утворення стримера в однорідному електричному полі відповідає умові самостійного розряду і дозволяє для даного розміру  $L$  визначити мінімальну пробивну напругу проміжку.

*Приклад.* Визначити напругу розряду для повітряного проміжку:



$$U_p = 24,5 \cdot L \cdot \delta + 6,4 \cdot \sqrt{\delta \cdot L} \text{ кВ. } L = 2 \text{ см:}$$

$$\delta = 0,386 \cdot \frac{P}{273 + t} = \frac{0,386 \cdot 740}{273 + 22} = 0,968;$$

$$U_p = 24,5 \cdot 2 \cdot 0,968 + 6,4 \cdot \sqrt{0,968 \cdot 2} = 56,337 \text{ кВ.}$$

Для однорідного поля, яке характеризується постійною напруженістю  $E$  в міжелектродному проміжку  $L$  і постійним числом іонізаційних зіткнень  $\alpha$ , розрядна напруга визначається формулами

$$E = \frac{U}{L}; \quad U = E \cdot L; \quad \gamma \cdot e^{\alpha L} \geq 1; \quad e^{\alpha L} \geq \frac{1}{\gamma}; \quad \alpha L = \ln \frac{1}{\gamma}. \quad (2.7)$$

При напруженості  $E \leq 100$  кВ/см і реальних відстанях між електродами  $L$ , враховуючі, що  $\alpha = A \cdot \delta \cdot e^{-B\delta/E}$ ,  $\alpha \cdot L = \ln 1/\gamma$  ( $\gamma$  – довідникове):

$$U_p = \frac{B \cdot \delta \cdot L}{\ln A \cdot L / [\ln(1/\gamma)]}. \quad (2.8)$$

Напруга і напруженість, при яких починається самостійний розряд, називаються *початковими*: тобто  $U_p = U_{поч.}$  і  $E_p = E_{поч.}$  – для однорідного поля. В однорідному полі початкова напруга дорівнює розрядній, а початкова напруженість визначає умови розвитку самостійного розряду.

У неоднорідних полях (рис. 2.3) проблема визначення величини розрядної напруги набагато складніша. На практиці використовують формули, отримані в результаті апроксимації великої кількості експериментальних даних для конкретного виду полів.

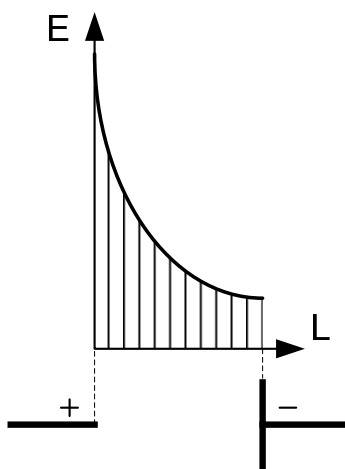


Рисунок 2.3 – Розподіл напруженості в різко неоднорідному полі

У неоднорідному полі напруженість розподіляється так: у стрижневого електрода відбувається різкий спад напруги. Різниця потенціалів у міжелектродному проміжку дуже різко змінюється в міру віддалення від стрижневого електрода. Такий характер розподілу електричного поля називають *градієнтом* потенціалу. Прикладена різниця потенціалів може бути недостатньою для пробоя міжелектродного проміжку, а різниця потенціалів між стрижневим електродом і проміжком поблизу нього зможе забезпечити умови самостійного розряду ( $U_{поч.}$ ,  $E_{поч.}$ ). При цьому локальний розряд, що відбувається поблизу загостреного електрода, називається *коронним*. Отже, виконання умов самостійності розряду в локальній ділянці неоднорідного поля проявляється у вигляді коронного розряду, що супроводжується потріскуванням і світінням навколо гострого електрода:  $U_{поч.} = U_{кор.}$ ;  $E_{поч.} = E_{кор.}$ .

Початок коронного розряду супроводжується інтенсивною іонізацією міжелектродного проміжку. Зона іонізації поступово розширюється і може відбутися пробій між двома електродами. Отже коронний розряд – це самостійний розряд, при якому ударна іонізація відбувається в локальній ділянці МЕП поблизу коронуючого електрода. Він може мати *лавинну* чи *стримерну* форму. Лавинна форма виникає у електродів з малою кривизною поверхні (1-2 мм) і має вигляд світлого каналу у вузькому чохлі. При стримерному розряді структурна форма іонізації дискретна і світіння має вигляд розбіжних від основного каналу вузьких каналів.

Таким чином, розрядна напруга в однорідному полі набагато вища, ніж в неоднорідному, що треба враховувати при конструюванні та обслуговуванні електрообладнання. Спосіб підвищення електричної міцності проміжків з неоднорідним полем полягає у регулюванні (вирівнюванні) електричних полів а також у використанні *ефекту полярності* й *бар'єрного ефекту*.

Розглянемо два випадки (рис. 2.4). Якщо на стрижні (анод) «плюс», то електрони від катода рухаються до анода. Потрапивши в зону різкого підвищення напруженості електричного поля, вони прискорюються, випереджаючи об'ємний позитивний заряд іонів, що спотворює поле в міжелектродному проміжку, і осідають на стрижні-аноді. У результаті напруженість поля  $E$  у гострого електрода зменшується, а напруженість у проміжку зростає. На ділянці проміжку АВ розподіл потенціалу різко неоднорідний, що призведе до іонізації і подальшого пробію ділянки АВ при відносно незначних напругах.

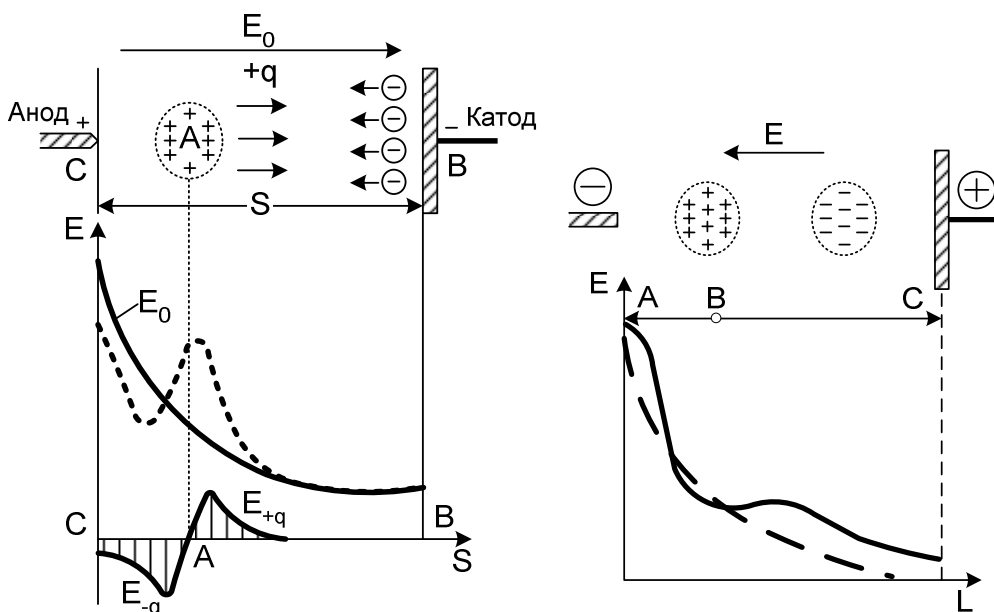


Рисунок 2.4 – Розподіл напруженості в міжелектродному проміжку

Якщо на стрижні «мінус», то електронна лавина виникає в тому ж обсязі поблизу стрижня. Однак стартова швидкість лавини ще більша, тому що градієнт потенціалу на ділянці проміжку AD значно вищий. Електрони прямують до позитивного електрода, залишаючи за собою об'ємний позитивний заряд  $E_{+q}$ , утворений іонами. Потрапивши в ділянку малого градієнта BC, вони різко гальмуються і захоплюються молекулами кисню, утворюючи малорухомий негативний об'ємний заряд  $E_{-q}$ . У стрижня (ділянка AB) – різка неоднорідність поля, що зменшує напругу запалювання видимої корони. На основній розрядній ділянці BC середнє значення градієнта напруженості вирівнюється і величина розрядної напруги різко (удвічі) збільшується. Це явище називається *ефектом полярності* й використовується для підвищення розрядної напруги в установках постійного струму (рис. 2.4).

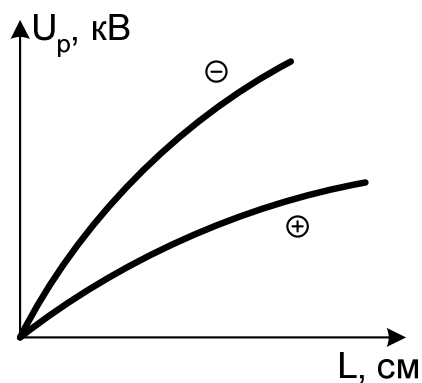


Рисунок 2.5 – Залежність розрядної напруги від полярності електродів

*Бар'єрний ефект.* Ефективним способом підвищення електричної міцності ізоляційних проміжків є використання бар'єрів. Бар'єр – це діелектрична пластина (папір, електрокартон), яку розміщують у міжелектродному проміжку перпендикулярно до силових ліній електричного поля. Завдяки концентрації на поверхні бар'єру зарядів того ж знака, що має коронуючий електрод, електричне поле стає більш однорідним. У результаті на ділянці ВС (рис. 2.6) поле вирівнюється, а на ділянці АВ, якщо  $l \sim (1/5 \div 1/7) \cdot L$ , – утворюється слабка неоднорідність. Це призводить до збільшення електричної міцності проміжку приблизно у 2–3 рази при позитивній полярності коронуючого електрода і в 1,2–1,3 рази при негативній полярності. З урахуванням ефекту полярності, розрядна напруга між електродного проміжку при розташуванні бар'єра на відстані  $l$  від стрижневого електрода збільшується незалежно від полярності електродів, тобто, і при змінній напрузі. Це явище широко використовується при конструюванні комбінованої внутрішньої ізоляції (маслобар'єрна, паперо-масляна). Слід зауважити, що електрична міцність проміжку з бар'єром суттєво залежить від відстані бар'єру до коронуючого електрода (рис. 2.5). Найбільша електрична міцність спостерігається при розташуванні бар'єру на відстані  $x = 0,2 \div 0,3 \cdot L$  – довжини проміжку (рис. 2.7).

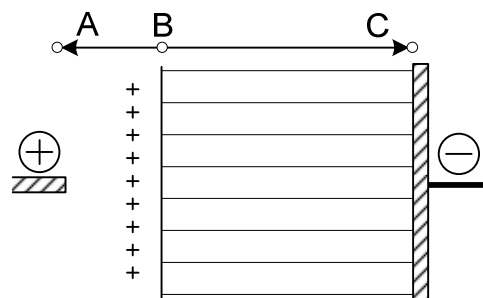


Рисунок 2.6 – Вирівнювання електричного поля за рахунок бар'єру

Як постійна, так і змінна напруги стосовно тривалості розвитку розряду ( $\sim 10^{-6}$  с.) є *довгодіючими* процесами, оскільки напівперіод напруги частоти 50 Гц складає  $10^{-2}$  с. Тому характер розподілу напруженості в однорідному полі практично не впливає на процеси розвитку розряду. Якщо поле неоднорідне, то визначальною є найменша розрядна напруга, обумовлена ефектом полярності ( $\oplus$  на коронуючому електроді).

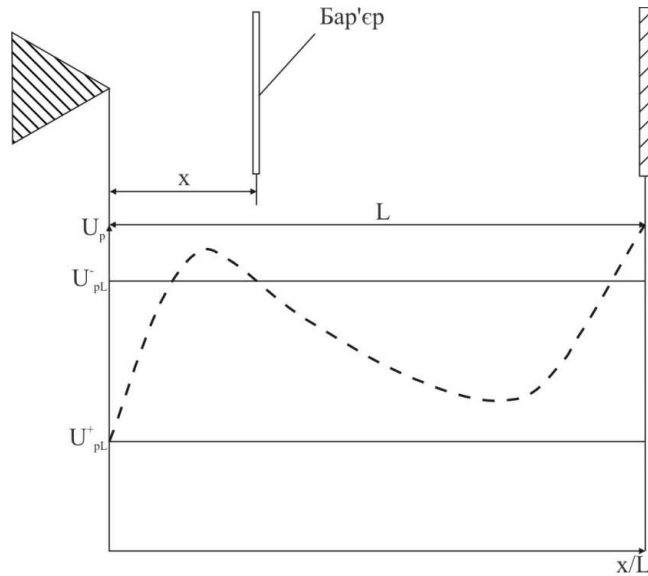


Рисунок 2.7 – Електрична міцність проміжку залежно від розташування бар'єру відносно стрижневого електроду

## 2.2 Регулювання електричних полів гірлянди ізоляторів

Регулювання електричних полів в електроустановках полягає у перетворенні неоднорідних полів в однорідні з метою підвищення електричної міцності міжелектродних проміжків і запобіганню виникнення коронних розрядів в елементах електрообладнання. Якщо в парі електродів стрижень-площина замість стрижня встановити кулю діаметром 75 см, то при відстані між електродами 100 см, електрична міцність проміжку за рахунок вирівнювання електричного поля збільшиться удвічі!

У найбільш масових елементах конструкції ЛЕП – гірлянди ізоляторів змінна напруга розподілена по елементах гірлянди різко нерівномірно.

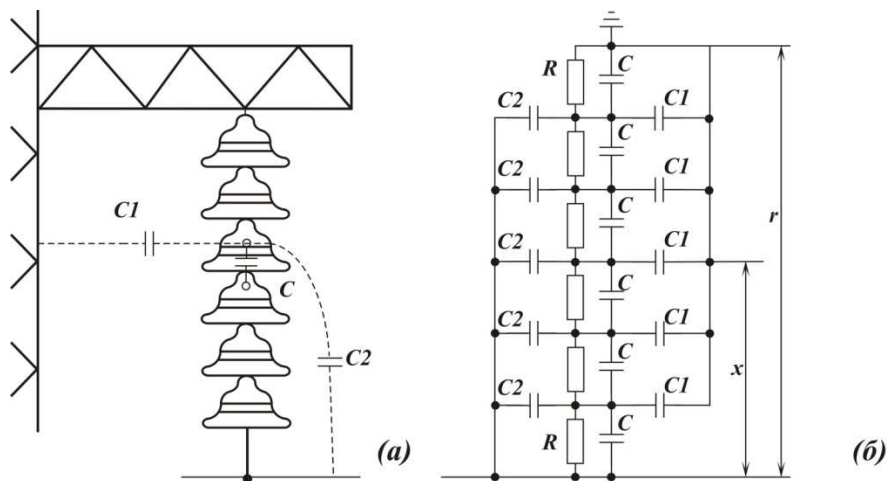


Рисунок 2.8 – Еквівалентна схема гірлянди ізоляторів

Наведена на рисунку 2.8 гірлянда ізоляторів та її еквівалентна електрична схема пояснюють причину цього явища, яке полягає в тому, що окрім ємностей кожного елемента гірлянди  $C$  існують також ємності кожного з цих елементів відносно заземленої траверси  $C_1$  і ємності відносно проводу  $C_2$ . Звичайно елементи гірлянди мають особисті ємності  $C \approx 50$  пФ, а ємності  $C_1$  і  $C_2$  – відповідно 5 і 1 пФ. Оскільки  $C_2 > C_1$ , то розподіл напруги по елементах гірлянди несиметричний і найбільше падіння напруги буде на першому від проводу ізоляторі, оскільки внаслідок відтоку струмів в ємності  $C_1$ , найбільша величина струму через особисті ємності гірлянди  $C$  буде біля проводу. Звичайно максимальна допустима напруга на ізоляторі сягає 30–60 кВ, залежно від конструкції гірлянди, що визначається з умов відсутності коронного розряду на арматурі. У ЛЕП-220 кВ і вище напруга на першому ізоляторі може перевищувати допустимі значення, тому її зменшують за допомогою застосування спеціальних ємнісних екранів, які розташовують поблизу місць закріплення проводів.

### 2.3 Регулювання електричних полів у внутрішньої ізоляції

Для надійної роботи внутрішньої ізоляції необхідно, щоб максимальна напруженість електричного поля на них не перевищувала допустимої величини:  $E_{max} \leq E_{дон}$ . Запишемо  $E_{max}$  через коефіцієнт неоднорідності електричного поля  $K_n$  і середню напруженість поля  $E_{cp} = U/d$  ( $U$  – робоча напруга;  $d$  – товщина ізоляції), звідки отримаємо

$$(U/d) \cdot K_n \leq E_{дон} \quad \text{або} \quad d \geq (U / E_{дон}) \cdot K_n \quad (2.9)$$

Звідки виходить, що при заданому  $E_{дон}$  потрібна товщина ізоляції буде пропорційна коефіцієнту неоднорідності поля, тобто товщина бар'єру мінімальна, якщо поле однорідне. У конструкціях з паперово-масляною ізоляцією ефективним способом регулювання електричних полів є *градирування* ізоляції, яке реалізується використанням комбінації діелектричних матеріалів з різною діелектричною проникністю  $\epsilon$ . Внаслідок



рівності потоків зміщення через циліндричні поверхні радіусом  $r_1$  і  $r_2$  можна записати

$$2\pi r_1 \varepsilon_0 \varepsilon_1 E_{max} = 2\pi r_2 \varepsilon_0 \varepsilon_2 E_{max}, \quad (2.10)$$

тут  $E_{1max}$ ,  $E_{2max}$  – напруженості поля у електрода радіуса  $r_1$  і на циліндричній поверхні  $r_2$ . З виразу (2.10) випливає, що при  $E_{1max} = E_{2max}$  :

$$\varepsilon_1 r_1 = \varepsilon_2 r_2. \quad (2.11)$$

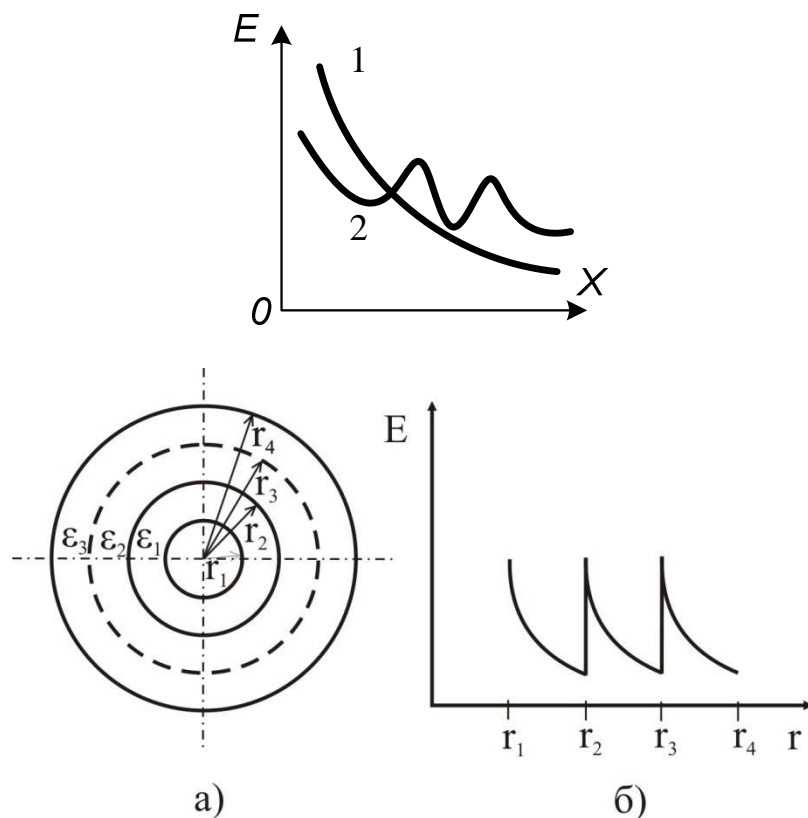


Рисунок 2.9 – Регулювання електричного поля методом градирування ізоляції в кабелі

Як видно з рисунку 2.9, при використанні однорідного діелектрика розподіл напруженості електричного поля від центральної жили кабелю до зовнішньої оболонки буде різко неоднорідним (крива 1). Якщо ж використати декілька ізоляційних матеріалів з різною діелектричною проникністю:  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ , так, щоб  $\varepsilon_1 > \varepsilon_2 > \varepsilon_3$ , то розподіл напруженості поля буде більш однорідним (крива 2). На практиці градирування паперово-масляної ізоляції кабелів здійснюють різними сортами паперу, які відрізняються щільністю. Найбільше значення  $\varepsilon$  має папір з більшою щільністю. У кабелях надвисокої напруги (500 кВ і більше) використовують 3 – 5 шарів паперу з різними  $\varepsilon$ .

## 2.4 Регулювання полів конденсаторними обкладинками

Регулювати електричні поля в ізоляції можна за допомогою конденсаторних обкладинок – додаткових електродів з металевої фольги, які розташовують в товщі ізоляції між основними електродами (рис.2.10). Завдяки зміні числа, розмірів та взаємного розташування конденсаторних обкладинок можна змінювати ємності послідовно ввімкнених конденсаторів, що їх утворюють ці обкладинки, і здійснювати вирівнювання електричного поля вздовж ізолятора.

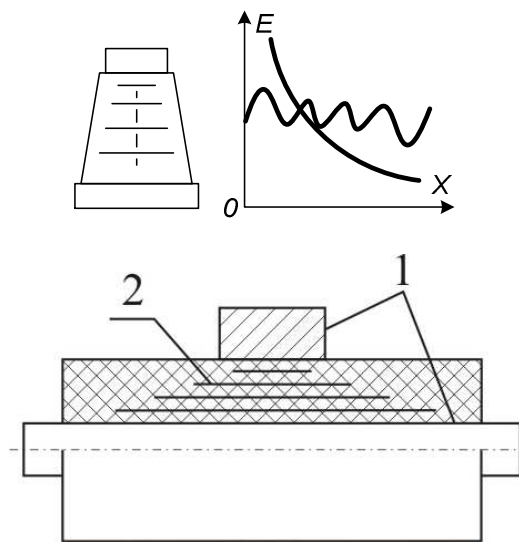


Рисунок 2.10 – Регулювання електричного поля конденсаторними обкладинками

Конденсаторні обкладинки можуть використовуватись для регулювання поля як в радіальному, так і осьовому напрямку вісі ізолятора (рис. 2.10). Якщо прийняти умову, щоб максимальна напруженість електричного поля між двома сусідніми обкладинками була однаковою, то необхідні розміри їх визначають з умови:  $r \cdot l = \text{const}$ , де  $r$  – радіус, а  $l$  – довжина обкладинки. При достатній кількості обкладинок відстань між ними мала (2-4мм), тому різниця між напруженостями електричного поля незначна і в радіальному напрямку практично буде постійною. За допомогою конденсаторних обкладинок можна регулювати електричне поле і у вводах з масло-бар'єрною ізоляцією. При цьому обкладинки розташовують на бар'єрах циліндричної форми. Оскільки на краях обкладинок напруженість електричного поля досить значна, то збільшують

радіус округлення країв обкладинок, наприклад, шляхом їх завертання або розташування між краями додаткових електродів.

## 2.5 Використання напівпровідникових плівок

Якщо електрод має гостру кромку і знаходиться в контакті з іншим видом ізоляції (газової, рідкої або твердої), то напруженість електричного поля між ними зростає завдяки різним діелектричним проникностям  $\epsilon$  цих матеріалів. Для запобігання цьому застосовують напівпровідникові покриття, які дають змогу зменшити складову напруженості електричного поля  $E_x$ , спрямовану уздовж поверхні твердої ізоляції (рис. 2.11).

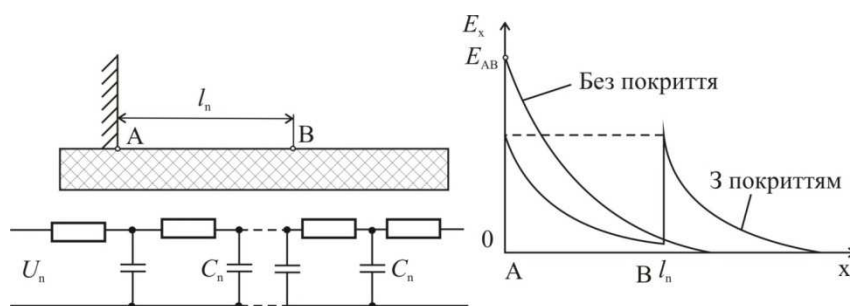


Рисунок 2.11 – Регулювання електричного поля напівпровідниковими плівками

Зміна потенціалу й напруженості  $E_x$  уздовж поверхні твердої ізоляції визначається питомим поверхневим опором  $p$  і питомою поверхневою ємністю  $C_{нов} = \epsilon_0 \epsilon_r / d$ , тут  $d$  – товщина ізоляції. За допомогою схеми заміщення визначаємо найбільшу напруженість у точці A:  $E_A = \frac{U \sqrt{\omega \rho_s \epsilon_0 \epsilon_r}}{d}$ . При застосуванні напівпровідникового покриття з поверхневим опором  $p_n < p_s$  напруженість в точці A буде дорівнюватиме:  $E_A = \frac{U \sqrt{\omega \rho_n \epsilon_0 \epsilon_r}}{d}$ , – тобто зменшиться в  $\frac{\sqrt{\rho_s}}{\rho_n}$  раз.

### Запитання для самоконтролю

1. Види й класифікація електричних полів.
2. Що таке «краєвий»(граничний) ефект, де він виникає?
3. Викладіть основи теорії стріперного розряду.
4. Сформулюйте критерій переходу лавини в стример.

5. У чому полягає фізичний зміст бар'єрного ефекту?
6. Яка причина прояву ефекту полярності?
7. Як впливає неоднорідність поля на електричну міцність ізоляції?
8. Що означає термін «регулювання електричних полів»?
9. Що таке «градирування» ізоляції?
10. У чому полягає метод конденсаторних обкладинок?
11. У чому причина нерівномірного розподілу напруги по гірлянді?
12. Як можна вирівняти розподіл напруги по гірлянді ізоляторів?

### 3 КОРОНА НА ПРОВОДАХ ЛЕП

#### 3.1 Механізм виникнення коронного розряду

Якісно фізичний процес виникнення коронного розряду обумовлений наявністю високого градієнта потенціалу (напруженості поля  $E$ ) біля загостреного електрода (проводу):

$$\vec{E}_x = \text{grad}_x \varphi = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} . \quad (3.1)$$

Ця висока напруженість електричного поля може бути достатньою для виникнення самостійного розряду в локальній зоні міжелектродного проміжку. Фазна напруга ЛЕП-110 кВ, між землею та проводом дорівнює:  $\frac{110}{\sqrt{3}}$  кВ. При великій відстані  $L$  проводів до землі цієї напруги недостатньо для виникнення самостійного розряду. Однак біля проводу на відстані  $\sim 1$  см існує дуже високий градієнт, де напруженість перевищує  $25 \div 30$  кВ/см, що більше значення критичної напруженості для повітря –  $24,5$  кВ/см і тут виникає локальний самостійний розряд – *корона*. Початкову напруженість розряду – напруженість появи корони обчислюють за формулою

$$E_{нк} = 24,5 \cdot \delta \cdot \bar{m} \cdot \left[ 1 + \frac{0,65}{(r \cdot \delta)^{0,38}} \right], \quad (3.2)$$

а при малих радіусах проводів використовують формулу Піка

$$E_{нк} = 30,3 \cdot \delta \cdot \bar{m} \cdot \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{r \cdot \delta}}\right) \text{ кВ/см, при } r < 1 \text{ см.} \quad (3.3)$$

Коефіцієнт  $\bar{m}$  – характеризує тут негладкість проводу. Для кручених проводів, які застосовують в ЛЕП,  $\bar{m} = 0,82 \div 0,94$ . В умовах дощу, снігу, ожеледі  $\bar{m} = 0,57 \div 0,73$  і корона виникає при меншій напруженості електричного поля. Напруга (початкова) появи корони

$$U_{нк} = E_{нк} \cdot r \cdot \ln \frac{2 \cdot L}{r}, \quad (3.4)$$

де  $r$  і  $H$  – радіус і середня висота підвісу проводу, см (або висота підвісу нижнього проводу). Облік втрат на корону необхідно проводити, якщо робоча напруженість  $E$  біля проводу наближається до величини початкової напруженості

$$E = \frac{Q}{2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot r}, \quad (3.5)$$

де  $Q$  – максимальне фазне значення заряду на поверхні проводу (Кл/км),  
 $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-9}$  Ф/км – діелектрична проникність повітря.

Виразимо заряд  $Q$  через діюче значення лінійної (номінальної) напруги лінії  $U_l$  і ємність фази  $C$ :  $Q = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} C \cdot U_l$ , і отримаємо величину допустимої робочої напруженості  $E_p$ , при якій корона відсутня

$$E_p = 0,0147 \frac{CU_l}{r} \text{ (кВ/см)} \quad (3.6)$$

Таким чином, якщо напруженість на проводі  $E_p \geq 0,5 \cdot E_{нк}$ , то втрати на корону значні і їх необхідно обмежувати.

Основним способом зменшення втрат на корону є збільшення діаметра проводу, що призведе до збільшення його поверхні і зменшення напруженості поля навколо нього. Для ЛЕП 110÷220 кВ найменша розрахункова величина діаметра проводів (без корони) становить відповідно 1÷2 см.

Для ЛЕП 110 кВ діаметр = 9,5 мм; для ЛЕП 150 кВ = 13,5 мм; для ЛЕП 220 кВ = 21,5 мм.

### 3.2 Методи запобігання коронному розряду

Виключення корони на проводах ЛЕП досягають двома основними способами:

- розчленовуванням проводів фаз;
- розширенням проводів коли замість центральної сталеві жили застосовують нейлонову або іншу непровідну (вуглепластикову), а провідникові сегменти розташовують по її периметру.

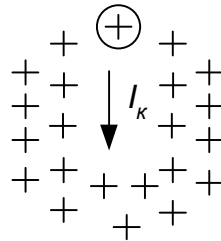


Рисунок 3.1 – Утворення об'ємного заряду і струму корони

При коронному розряді в результаті іонізації повітря біля поверхні проводу утворюється об'ємний заряд того ж знака, що і потенціал проводу (рис. 3.1). Напруженість поля біля поверхні проводу під час коронування залишається рівною  $E_n$ . Збільшення напруги на проводі призводить до посилення іонізації, зростання об'ємного заряду і зниження напруженості до  $E_n$ . При збільшенні напруженості об'ємного заряду втрати енергії на корону зростають тим більше, чим більше напруга на проводі перевершує *початкову* напругу корони  $E_n$ . Оскільки об'ємні заряди переміщуються від проводу в напрямку до землі, напруженість поля біля проводу зростає. Але через посилення іонізації об'ємний заряд поповнюється, напруженість падає до  $E_n$  і корона зберігається необмежено довго. При змінній напрузі об'ємні заряди здійснюють зворотно-поступальні коливання біля проводу, поступово віддаляючись від нього в ділянку слабкого поля, де вони рекомбінують. При великих діаметрах проводів зона іонізації велика і при початковій напрузі  $U_n$  може досягати критичної довжини. Тоді корона виникає одразу в стримерній формі.

На проводах малих (до 1 см) діаметрів корона виникає в лавинній формі. Але при збільшенні напруги понад  $U_n$  розмір зони іонізації збільшується і корона переходить у стримерну форму. Струм стримерної корони складається з окремих імпульсів з дуже крутими фронтами ( $\sim$  десятки наносекунд). Ця високочастотна складова струму корони є джерелом інтенсивного електромагнітного випромінювання із широким спектром частот, що створюють значні перешкоди радіо- і телевізійному прийому.

При змінній напрузі корона виникає, якщо напруженість поля на проводі досягає  $E_n$  і горить, поки напруга не досягне максимуму. Потім напруженість поля на проводі стає нижче  $E_n$  і корона гасне. Оскільки позитивні іони малорухомі, то в кожен позитивний напівперіод змінної напруги об'ємний заряд підсилюється і корона запалюється раніше. Негативний об'ємний заряд завдяки більшій рухливості електронів, що переміщуються в напрямку до землі, – значно меншій, тому він менше підсилює об'ємний заряд, внаслідок чого напруга запалювання корони в негативний напівперіод нижча. Залежність напруги запалювання корони від величини потенціалу на проводі називають *характеристикою запалювання* корони. При змінній напрузі коронування більш інтенсивне і втрати на корону значно більші, ніж при постійній (рис.3.2). Основні втрати електроенергії від коронного розряду обумовлені переміщенням об'ємного заряду до землі, оскільки втрати на іонізацію на порядок менші.

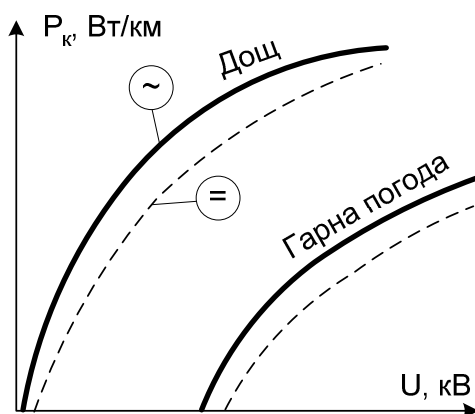


Рисунок 3.2 – Втрати потужності від корони при змінній та постійній напрузі

Атмосферні опади утворюють виступи на поверхні проводів, різко збільшуючи напруженість на них електричного поля. Початкова напруженість запалювання корони  $E_n$  при цьому різко падає. Рівняння характеристики запалювання корони має вигляд:  $U_{зан} = 2U_n - U_m$  (тут  $U_m$  – амплітудне значення напруги на проводі). Через різну рухливість носіїв заряду – електронів та іонів напруга запалювання в *позитивний напівперіод* вища, ніж в негативний.

Для того, щоб виключити втрати енергії від корони і радіоперешкоди, *початкова напруга запалювання* корони повинна бути *не нижча* найбільшої робочої напруги лінії щодо землі. При атмосферних опадах виключити коронування проводів практично неможливо (в тому числі з техніко-економічних міркувань), тому діаметр проводів розраховують тільки з умов виключення корони в суху погоду.

Прийmemo для спрощення  $E_n \approx 30,3 \cdot \bar{m} \cdot \delta$ , тоді

$$U_n \approx E_n \cdot r \cdot \ln \frac{2HL}{r \cdot 2H} = 30,3 \cdot \bar{m} \cdot \delta \cdot r \cdot \ln \frac{L}{r}. \quad (3.7)$$

Умова виключення корони

$$30,3 \cdot \bar{m} \cdot \delta \cdot r \cdot \ln \frac{L}{r} \geq \frac{U_{ном} \sqrt{2}}{\sqrt{3}}. \quad (3.8)$$

Прийнявши коефіцієнт не гладкості  $\bar{m} = 0,8$ ,  $\delta = 1$  і  $\ln \frac{L}{r} \approx 6,2$  (характерне для ліній 110÷220 кВ), одержуємо для ЛЕП 110÷220 кВ

$$d \geq 0,011 \cdot U_{ном}, \quad (3.9)$$

тобто діаметр проводів для ЛЕП-110 кВ з вимогами відсутності корони повинен бути – 1,2 см.; а для ЛЕП–220 кВ – 2,4 см при нормальних умовах.

При  $U_n \geq 330$  кВ необхідні проводи більшого діаметра, але щоб площа поперечного перерізу і діаметр були незалежні. Ця вимога реалізується в так званих *розширених проводах*, в яких струмопровідні сегменти розташовані по периметру непровідної центральної серцевини.

Застосовують також *розщеплення фаз* – коли кожна фаза лінії складається не з одного, а декількох проводів меншого діаметра (рис. 3.3). Це дозволяє при



необхідному сумарному перерізі проводів істотно знизити максимальну напруженість поля на їхній поверхні. При цьому заряд кожного проводу  $q_1$  складає тільки частину загального заряду розщепленої фази  $q_\phi$

$$q_1 = \frac{q_\phi}{n} = \frac{C_{p\phi} \cdot U_\phi}{n}, \quad (3.10)$$

де  $n$  – число проводів у фазі;  $C_{p\phi}$  – ємність одиниці довжини проводу розщепленої фази.

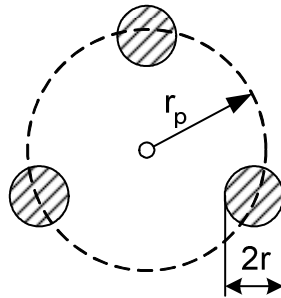


Рисунок 3.3 – Характеристики розщепленої фази

Якщо  $r_p$  – радіус розщеплення, то у трифазній системі ємність розщепленої фази

$$C_{p\phi} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln L} \cdot \frac{1}{r_e}, \quad (3.11)$$

де  $L$  – середньо геометрична відстань між фазами;

$r_e = \sqrt[4]{n \cdot r \cdot r^{n-1}}$  – еквівалентний радіус одиночного проводу, який має ту ж ємність, що і розщеплена фаза.

Тоді середня робоча напруженість електричного поля на поверхні проводів розщепленої фази дорівнюватиме

$$E_{cp} = \frac{q_1}{(2\pi\epsilon_0 \cdot n \cdot r)} = \frac{U_\phi}{\left( n \cdot r \cdot \ln \frac{L}{r_e} \right)}, \quad (3.12)$$

а максимальна

$$E_{max} = k_y E_{cp} = f(n, r_p), \quad (3.13)$$

де  $k_y = 1 + (n - 1) \frac{r}{r_p}$  – коефіцієнт, що враховує підсилення напруженості

електричного поля через вплив зарядів на сусідніх проводах розщепленої фази (рис. 3.4).

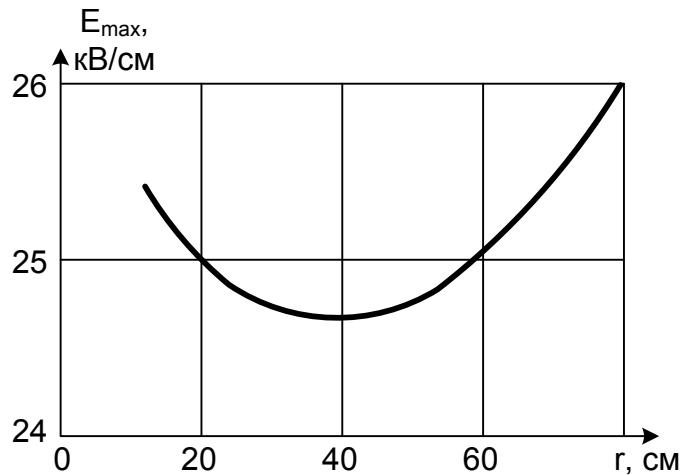


Рисунок 3.4 – Залежність максимальної напруженості електричного поля розщепленої фази від відстані між проводами ЛЕП-500кВ ( $n=3$ )

При збільшенні радіуса розщеплення  $r_p$  зменшується вплив зарядів сусідніх проводів, але збільшується ємність фази і її заряд. Таким чином, існує оптимальний радіус розщеплення, при якому  $E_{max}$  – найменша (тут  $r$  – відстань між проводами). Отже з (3.13) випливає, що мінімальне значення напруженості  $E_{max}$  визначається оптимальним радіусом розщеплення  $r_p$  і числом одиночних проводів  $n$ .

Таким чином, наявність корони на проводах ЛЕП є негативним явищем з таких причин:

- корона супроводжується утворенням поблизу проводів ЛЕП і переміщенням до землі об'ємних зарядів, що призводить до активних втрат електроенергії, які досягають  $\sim 40\%$  втрат від нагріву проводів;

- струм коронного розряду – імпульсний зі спектром частот від 0,15 до 1000 МГц, що створює перешкоди у всьому радіо- та теледіапазоні;

- акустичний шум шкідливий для людини і вимагає збільшення зони відчуження ЛЕП.

Однак збільшенням діаметра проводів і зниженням напруженості поля на їхній поверхні неможливо виключити корону при несприятливих атмосферних умовах. В місцях пошкодження проводів і арматури гірлянд, на елементах кріплення (тобто в зонах місцевого посилення поля) навіть в нормальних умовах може виникнути місцева корона. На лінії, якщо робоча напруга перевищує початкову:  $U_p > U_n$ , то виникає загальна корона.

Загальні втрати енергії від корони розраховують на основі експериментальних даних про втрати при різних погодних умовах: сухій погоді; сухому снігу; дощу; ожеледі; паморозі (рис. 3.5). Для траси ЛЕП використовують дані метеорологічних спостережень про тривалість різних погодних умов у годинах:  $h_{xn}$  – хороша погода;  $h_c$  – сніг;  $h_d$  – дощ;  $h_n$  – паморозь. Річні втрати (в кВт·год/км) визначають за формулою

$$A_k = N^2 \cdot r^2 \cdot (P_{xn} \cdot h_{xn} + P_d \cdot h_d + P_c \cdot h_c + P_n \cdot h_n), \quad (3.14)$$

де  $N$  – загальне число проводів у 3-х фазах лінії;  $P_{xn}$ ,  $P_d$ ,  $P_c$ ,  $P_n$  – потужність втрат електроенергії від корони при різних погодних умовах (рис. 3.5).

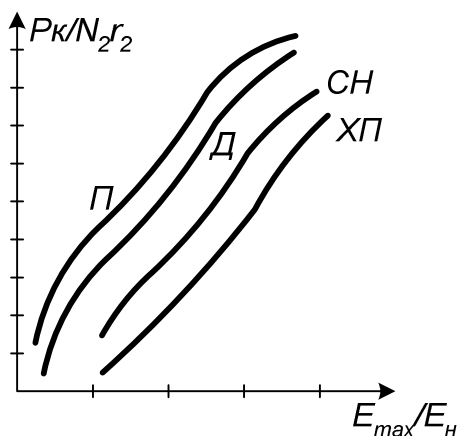


Рисунок 3.5 – Узагальнені характеристики втрат потужності від корони при різних погодних умовах

За співвідношенням  $E_{max}/E_n$  з графіка (рис. 3.5) визначають потужність втрат. Середньорічна потужність втрат від корони

$$P_{c.p} = \frac{A_k}{8760}, \text{ кВт/км.} \quad (3.15)$$

При проведенні техніко-економічних розрахунків необхідно враховувати втрати від корони, якщо  $E_{max}/E_n > 0,5$ . Економічно прийнятні втрати від корони при умові:  $E_{max}/E_n \leq 0,9$  – це умова вибору діаметра проводів з погляду обмеження втрат від корони.

Радіоперешкоди від корони максимальні на ЛЕП надвисокої напруги в дощ і сніг. Основне джерело радіоперешкод – стримерна корона. Спектр частот радіоперешкод – від 10 кГц до 1 ГГц. Перешкоди на частотах більших за 30 МГц виникають у ЛЕП–750 кВ і заважають теле– і радіозв'язку. Інтенсивність радіоперешкод характеризується вертикальною складовою напруженості електричного поля біля поверхні землі ( $E_2$ ). Рівень радіоперешкод визначають

$$Y = 10 \lg \left( \frac{E_2}{E_1} \right)^2 = 20 \lg \frac{E_2}{E_1}, \text{ дБ}, \quad (3.16)$$

де  $E_1$  – напруженість електричного поля біля провода, мкВ/м. Приймаємо за базову  $E_1 = 1$  мкВ/м, тоді:

$$Y = 20 \cdot \lg E_2 \quad (3.17)$$

Залежність рівня радіоперешкод від напруженості електричного поля на проводі лінійна і визначається емпіричною формулою

$$Y_2 - Y_1 = k_1(E_2 - E_1), \text{ дБ}, \quad (3.18)$$

де  $k_1 = 1,8$  – коефіцієнт при напруженостях поля 20÷30 кВ/см.

Допустима напруженість радіоперешкод нормується на частоті 1 МГц і в хорошу погоду не повинна перевищувати 50 мкВ/м на відстані 50м від ЛЕП – 330 – 750 кВ. Як розрахункова, за рекомендацією міжнародного комітету з радіоперешкод, прийнята частота  $f = 0,5$  МГц. Рівень допустимого сигналу радіоперешкод в гарну погоду не повинен перевищувати 40 дБ, що дає:  $40 = 20 \cdot \lg E$ , тоді  $E = 100$  мкВ/м. Це допустима напруженість електричного поля радіоперешкод на відстані 100м від проекції на землю крайнього проводу ЛЕП – 330 кВ і вище. Зі збільшенням відстані рівень радіоперешкод знижується

$$Y_2 - Y_1 = 20 \cdot k \cdot \lg \frac{l_1}{l_2}, \quad (3.19)$$

де  $k = 1.6$  – коефіцієнт загасання для частот 0,15÷1 МГц.

Збільшення радіуса проводів при незмінній напруженості поля на них призводить до зростання рівня радіоперешкод, тому що спад напруженості поля в радіальному напрямку сповільнюється, а створює умови для інтенсивної стримерної корони

$$Y_2 - Y_1 = 20 \lg \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^2. \quad (3.20)$$

Тут  $Y_2$  і  $Y_1$  – рівні радіоперешкод при напруженостях на проводах  $E_2$  і  $E_1$ , кВ/см.

З підвищенням частоти рівень радіоперешкод зменшується

$$Y_f = 5.5 \cdot [1 - 2(\lg 10 \cdot f)^2] \quad (3.21)$$

Перешкоди зростають також при забрудненні проводів

Акустичний шум, що впливає на психологічний і фізичний стан людини, має дві складові: шипіння, що відповідає частоті 100 Гц і кратним їй частотам, та широкопasmовий (так званий «білий») шум. Перша складова обумовлена рухом об'ємного заряду у проводів, що двічі за період створює хвилі звукового тиску, друга - генерується стримерною короною. За санітарними нормами допустимий рівень гучності акустичного шуму дорівнює 45 дБ (А).

Виходячи з цих вимог лінії 330 кВ і вище не повинні наближатися до населених пунктів ближче, ніж 300 м. Оцінку рівня гучності шуму корони  $A$  здійснюють за формулою

$$A = 16 + 1,14 \cdot E_{max} + 9r + 15 \lg n - 10 \lg l, \text{ дБ(А)}. \quad (3.22)$$

Звідки виходить, що інтенсивність акустичних перешкод істотно зростає при збільшенні числа проводів у фазі і відстані між ними.

### **Запитання для самоконтролю**

1. Фізичні причини виникнення коронного розряду?
2. Що таке «початкова напруженість» електричного поля?
3. Наведіть формулу Піка і дайте свій коментар щодо неї.
4. Що таке «коефіцієнт негладкості» проводу?
5. Негативні наслідки коронного розряду на проводах ЛЕП?

6. Методи запобігання коронного розряду на проводах ЛЕП?
7. Як впливають атмосферні фактори на виникнення корони?
8. Що таке «характеристика запалення» корони?
9. Як розрахувати втрати електроенергії від коронного розряду?
10. Як визначити рівень радіоперешкод від коронного розряду?

## 4 РОЗЯДИ В ПОВІТРЯНИХ ПРОМІЖКАХ ПРИ ГРОЗОВИХ ПЕРЕНАПРУГАХ

### 4.1 Параметри грозових імпульсів

Імпульсна перенапряга – короткотривала, має аперіодичний характер і характеризується вольт-секундною характеристикою:  $U_p = f(\tau_i)$ ,  $\tau_i$  – тривалість імпульсу перенапряги,  $\tau_\phi$  – тривалість фронту імпульсу.

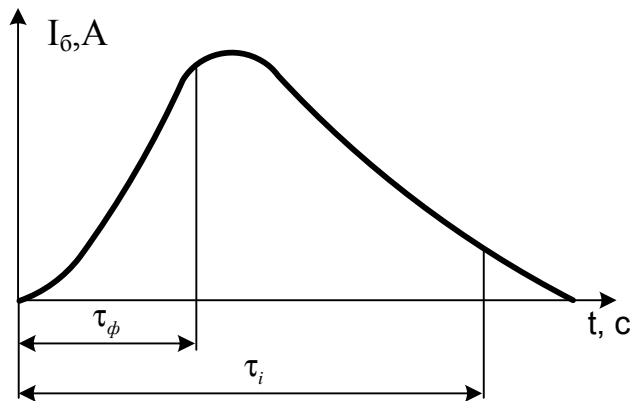


Рисунок 4.1 – Параметри імпульсу перенапряги

Електроустаткування повинно витримувати імпульсну випробувальну напругу уніфікованим грозовим імпульсом, що має такі параметри:

- тривалість фронту імпульсу:  $\tau_\phi = 1,2 \pm 0,36$  мкс.;
- тривалість самого імпульсу:  $\tau_i = 50 \pm 10$  мкс.;
- амплітуда імпульсу:  $I_\delta \approx 30 \div 200$  кА;
- крутизна фронту імпульсу:  $\partial I_\delta / \partial t = a = 13 \div 30$  кА/мкс.

Якщо до міжелектродного проміжку прикладена напруга пробою  $U_n$ , то для розвитку і встановлення розряду необхідний деякий час  $t_p$  – термін розряду, що складається з таких компонентів:  $t_p = t_x + t_c + t_\phi$ , тут  $t_x$  – час наростання напруги до  $U_n$ ;  $t_c$  – статистичний час запізнювання, пов'язаний з появою ефективного електрона (випадкова подія);  $t_\phi$  – час розвитку і формування розряду (теж статистична величина). Якщо тривалість прикладеної напруги менше  $t_p$ , то пробою не відбудеться. Чим вища прикладена напруга  $U_p$ , тим менше час розвитку розряду  $t_p$ . Залежність максимальної напруги розряду від часу дії імпульсу називається *вольт-секундною* характеристикою (ВСХ) ізоляції. Оскільки початок і швидкість протікання процесу іонізації залежать від величини  $U_{ном}$ , то ВСХ залежить від форми імпульсу (рис. 4.2).

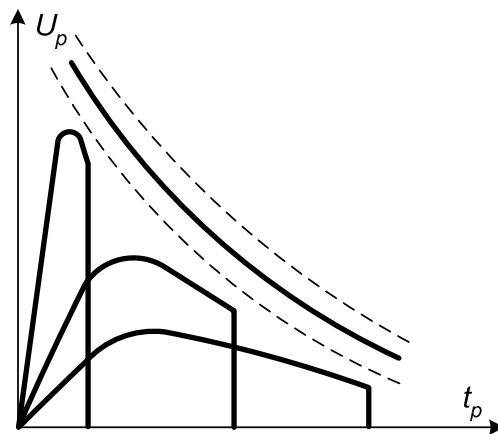


Рисунок 4.2 – Залежність величини розрядної напруги  $U_p$  ізоляції від тривалості  $t_p$  дії імпульсу перенапруги

Через статистичний розкид терміну розряду  $t_p$  ВСХ має вигляд смуги, для якої вказують середню криву, а її ширина визначає межі розкиду величини розрядної напруги (для трьох різних імпульсів). ВСХ також суттєво залежить від ступеня однорідності електричного поля (рис. 4.3).

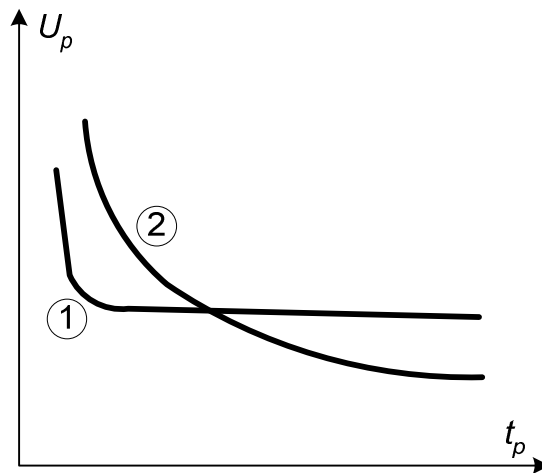


Рисунок 4.3 – Залежність характеру ВСХ від ступені однорідності поля;  
1 – однорідне поле; 2 – неоднорідне поле

Для однорідного поля ВСХ (1) паралельна осі абсцис і тільки при  $t_p \approx 1$  мкс і менше,  $U_p$  зростає. Це дозволяє використовувати такі проміжки (куля-куля), як універсальний прилад для виміру максимальних значень високої напруги  $U_p$ .

Для різко неоднорідних полів ВСХ (2) має більшу кривизну, тому що інтервал  $t_\phi$  сильно залежить від величини прикладеної напруги. Для таких проміжків при грозових імпульсах характерні більші розрядні напруги  $U_p$ , ніж при змінній напрузі  $U_\sim$  частотою 50 Гц. Відношення імпульсної розрядної напруги  $U_p$  до розрядної напруги на частоті 50 Гц  $U_\sim$ :  $k_{imn} = U_p / U_\sim$  називається коефіцієнтом імпульсу.

В однорідному полі  $k_{imn} = 1$ . Він характеризує кількісно реакцію ізоляції на комутаційні імпульси і змінну напругу. Найнижчі розрядні напруги має повітряний проміжок пари електродів стрижень-площина при  $\oplus$  на стрижні.

## 4.2 Електричні розряди в довгих повітряних проміжках

Найнижчу розрядну напругу має повітряний проміжок, утворений парою електродів стрижень-площина, що відповідає конфігурації ЛЕП: провід-земля. При досягненні робочою напругою величини  $U_n$ , зі стрижня розвивається



пучок стримерів (рис. 4.4). Об'ємний заряд, що при цьому утворюється, *знижує* напруженість електричного поля  $E$  у стрижня і розвиток розряду припиняється. Після цього напруга на проміжку знову зростає і з'являються нові спалахи стримерів.

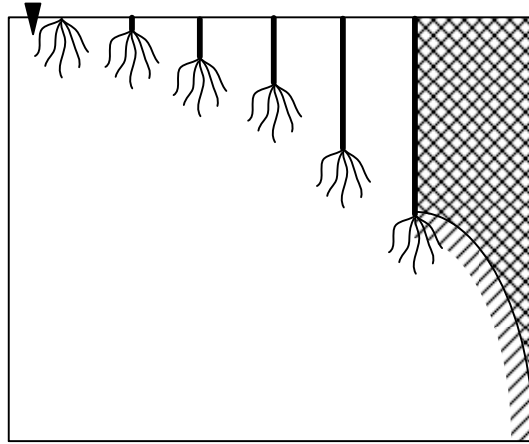


Рисунок 4.4 – Схема утворення лідерного розряду

Через нагрівання повітря (термоіонізацію) в зоні розвитку стримерів з'являється нове утворення – канал *лідера*. Лідер – це канал розряду, ініційований стримером. Концентрація частинок у ньому вища, ніж у стримері, що сприяє просуванню його до протилежного електрода. Швидкість розвитку лідера  $t_l \gg t_{cmp}$  ( $\sim 10^6$  см/с). Зростаюча напруженість на проміжку, іонізація, яскраві спалахи і проходження по каналу великого струму, призводять до початку наскрізної фази розряду. Лідер безпосередньо контактує з електродом, а наступні спалахи стримерів виникають з кінця лідера і подовжують його до протилежного електрода. Далі розвивається наскрізна фаза розряду, що характеризується різким зростанням струму в каналі. Наскрізна фаза завершується перекриттям проміжку лідерним каналом і розвитком *головного* розряду.

Перехід від лідерної стадії до головного розряду зручно порівнювати із замиканням на землю вертикального зарядженого проводу (рис. 4.5), який імітує провідний канал з щільністю заряду  $\sigma$ . При замиканні ключа  $K$ , відбувається нейтралізація негативних зарядів позитивними, що надходять із землі.

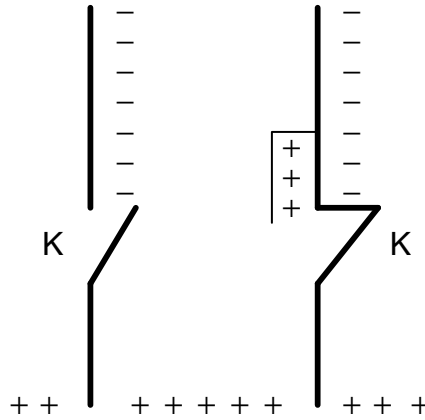


Рисунок 4.5 – Макетне пояснення механізму утворення головного розряду

Амплітуда струму, що розповсюджується по каналу зі швидкістю  $V$ :  $I_0 = \sigma \cdot V$ . Якщо заряд замикається через деякий опір  $R$ , то струм в каналі

$$I_0 = \sigma \cdot V \left( \frac{Z}{Z + R} \right), \quad (4.1)$$

де  $Z$  – еквівалентний хвильовий опір каналу блискавки.

Отже струм блискавки залежить від опору заземлення  $R$  і еквівалентного хвильового опору каналу блискавки  $Z$ . Із достатнім ступенем точності хвильовий опір блискавки вважають нескінченно великим, тобто блискавку розглядають як джерело струму.

Інтенсивність розвитку розряду безпосередньо залежать від крутості імпульсу перенапруги. При грозових імпульсах практично одразу починається наскрізна форма розвитку розряду. Таким чином пробій проміжку може бути чисто стримерним (у неоднорідному полі), або лідерним (при великих відстанях між електродами  $L$  і змінній напрузі).

У каналі лідера великими є число носіїв і густина струму. Вирішальна умова розвитку лідера – підведення електричної енергії за рахунок лідерного струму  $I_l$  для підтримки температури термоіонізації в каналі розряду (рис. 4.6).

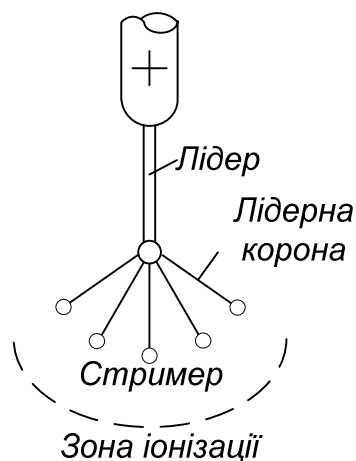


Рисунок 4.6 – Схема утворення головного розряду

У проміжку стрижень-площина з відстанню між електродами  $L \leq 1$  м при усіх видах напруг (постійна і змінна, комутаційних і грозових імпульсах) виникає тільки стримерний пробій. Стример проходить проміжок раніше, ніж розв'ється лідер. При великих  $L$  зберігається чисто стримерний розряд тільки при грозовому імпульсі (1,2/50 мкс) і постійній напрузі тому, що при імпульсній напрузі часу дії поля  $E$  недостатньо для процесу утворення лідера. При постійній напрузі утворення лідера утруднене завдяки тому, що виникне стримерний розряд. При грозових імпульсах наскрізна фаза розряду виникає практично миттєво.

Якщо маємо пару електродів – стрижень-площина з відстанню між ними  $L > 1$  м, то при комутаційному імпульсі і змінній напрузі утворюється лідер, що призводить до пробою проміжку. Напруженість електричного поля, при якій відбувається формування лідера,  $E \sim 4 \div 5$  кВ/см. Величина розрядної напруги при цьому може бути розрахована за формулою

$$U_p = E_l \cdot l_l + E_{zi} \cdot l_{zi}, \quad (4.2)$$

де  $l_l$  – довжина каналу лідера;  $l_{zi}$  – довжина зони іонізації;  $E_l$  – середня напруженість поля в каналі лідера;  $E_{zi} = 5$  кВ/см (середня напруженість в стримерній зоні). Можливість утворення лідера пов'язана з розвитком стримерної зони до критичної величини  $l_{кр}$ , при досягненні якої, через основний канал проходить струм, достатній для розігріву каналу і переходу його в лідер. При грозових імпульсах довжина зони іонізації (стримерної зони) практично

дорівнює міжелектродній відстані  $L$ , і тоді 50% розрядна напруга довгих проміжків може бути визначена як

$$\bar{U}_p \approx 5L, \quad (\text{тут } U_p, \text{ кВ}; L, \text{ см}). \quad (4.3)$$

Для оцінки розрядних напруг довгих повітряних проміжків необхідно визначити в момент встановлення наскрізної фази довжину зони іонізації  $l_{zi}$  і початкову напруженість в каналі лідера  $E_{л}$ . Експериментально отримані значення  $l_{zi}$  подані на графіку рисунка 4.7.

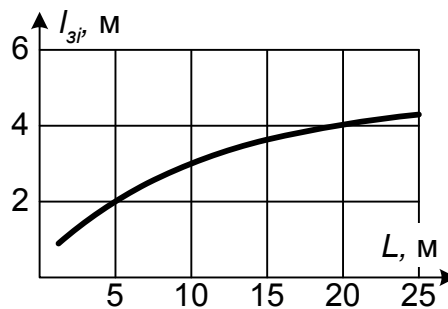


Рисунок 4.7 – Залежність довжини стримерної зони від відстані між електродами стрижень-площина

Ця залежність описується емпіричним рівнянням

$$l_{zi} \approx l_c = a_0 \cdot \left( 1 + \ln \frac{L}{a_0} \right), \quad (4.4)$$

де  $a_0$  – константа ( $a_0 = 1,5$  – для проміжку провід-площина);

$l_c$  – довжина стримерної зони.

Залежність середніх поздовжніх напруженостей у лідері від його довжини

$$E_{л} = E_{л0} \cdot \frac{a_0}{l_{л}} \cdot \ln \left( \frac{L}{a_0} - \ln \frac{L}{a_0} \right), \quad (4.5)$$

де  $l_{л} = L - l_c$ ,  $E_{л0} = 1,5$  кВ/см – початкова напруженість у каналі лідера.

Звідки одержуємо вираз для розрахунку 50%-них розрядних напруг довгих повітряних проміжків в області мінімуму ВСХ

$$U_{\min} = E_c \cdot a_0 \cdot \left( 1 + \ln \frac{L}{a_0} \right) + E_{л0} \cdot a_0 \cdot \ln \left( \frac{L}{a_0} - \ln \frac{L}{a_0} \right) - \text{формула Лемке}, \quad (4.6)$$

де  $E_c$  – середня напруженість у стримерній зоні.

### 4.3 Характеристика та параметри грозових перенапруг

Джерелом грозових перенапруг є блискавка, що являє собою електричний розряд між двома хмарами або між хмарою і землею. Блискавка виникає завдяки нагромадженню і розподілу зарядів у грозових хмарах внаслідок існування висхідних потоків повітря. Краплини води, що випаровуються з поверхні водойм, конденсуються у хмарах і замерзають в зоні низьких температур. Замерзання починається з поверхні краплини і позитивні іони під дією різниці температур пересуваються в поверхневий шар, заряджаючи його позитивно. Рідка серцевина при цьому набуває негативного заряду. Коли замерзає серцевина, поверхня краплини лопається, осколочки підіймаються вгору і заряджають верхню частину хмари позитивно. Нижня частина хмари виявляється зарядженою негативним потенціалом. При збільшенні концентрації негативних зарядів в нижній частині хмари зростає напруженість електричного поля і після досягнення критичної величини ( $\sim 24$  кВ/см) починається іонізація повітря і формування грозового розряду. Тому в більшості випадків (до 90%) грозової діяльності блискавки переносять в землю негативний заряд.

На початковій стадії блискавка являє собою слабо світний канал (лідер), який повільно, зі швидкістю  $1,5 \cdot 10^5$  м/с рухається в напрямку до землі. Заряди хмари і лідера *індукують* на поверхні землі заряди протилежного знака. З наближенням лідера до землі напруженість електричного поля землі зростає і з них можуть розвиватися зустрічні лідери. Сила струму в лідерній стадії блискавки досягає сотень ампер. На відстанях  $25 \div 100$  м між ними виникає висока напруженість і проміжок за декілька мікросекунд пробивається з виділенням енергії  $\sim 0,5 \div 5$  МДж, яка витрачається на нагрівання і термоіонізацію. Провідність каналу різко зростає і зона підвищеної напруженості переміщується до хмари зі швидкістю  $\sim 0,5$  швидкості світла. Струм у каналі досягає десятків і сотень тисяч ампер за  $5 \div 10$  мкс. Протягом короткого часу канал розігрівається до  $20 \div 30$  тисяч градусів Цельсія, швидко розширюється, що викликає утворення ударної хвилі (грім). Середня тривалість

удару блискавки не перевищує 0,1 с. При цьому відбувається нейтралізація заряду лідера. Цей процес називається *головним розрядом* і супроводжується сильним світінням каналу розряду.

Заряд і тривалість негативної блискавки, як правило, менша, ніж позитивної. Особливістю спадаючих негативних блискавок є багаторазові розряди внаслідок того, що через 10÷100 мс по іонізованому каналу першого розряду знову розвивається повторний лідер до землі зі значно більшою швидкістю. Це так званий стріловидний лідер. У більшості випадків блискавка складається з двох-трьох розрядів, але зареєстровано в одній блискавці до 40 розрядів.

Грозовий розряд здатний викликати різні пошкодження об'єктів. Основним вражаючим фактором є *струм блискавки*, величина якого визначається еквівалентним хвильовим опором каналу розряду  $Z$  а також опором заземлення  $R$ :  $I_{\sigma} = \sigma V \cdot \frac{Z}{Z+R}$ , тут  $\sigma$  – щільність заряду на одиницю довжини каналу,  $V$  – швидкість розповсюдження розряду. Статистика спостережень свідчить, що величина струму блискавки є випадковою величиною, але підлягає закону нормального розподілу і знаходиться в межах від 10 до 300 кА.

Іншим за значенням вражаючим фактором, що визначає індуктоване падіння напруги в провідниках і індуквані напруги в магнітно-зв'язаних ланцюгах, – є *крутість фронту* струму блискавки:  $a = di_{\sigma} / dt$ , величина якої також підлягає закону нормального розподілу. Але для оціночних розрахунків можна використовувати усереднені значення розподілу струму й крутості імпульсу блискавки, що апроксимуються наступними експоненційними функціями:

$$P(I_{\sigma}) = \exp(-0,04 \cdot I_{\sigma}); \quad (4.7)$$

$$P(a) = \exp(-0,08 \cdot a). \quad (4.8)$$

Заряд, що переноситься струмом блискавки, має теплову й електродинамічну дію. Енергія, що виділяється в опорній ділянці блискавки, пропорційна миттєвому значенню струму, який витрачається на нагрівання і

плавлення металу в цьому місці. Інтеграл квадрату струму блискавки  $\int i^2 dt$  визначає електродинамічну дію та нагрівання струмопроводів при проходженні струму блискавки через уражений об'єкт. Блискавка крім первинної дії, що проявляється у вигляді теплового та механічного руйнування уражених об'єктів, може мати також небезпечні вторинні наслідки. Вони пов'язані з виникненням електрорушійних сил завдяки електростатичним та електромагнітним полям каналу блискавки, які спроможні наводити дуже високі потенціали на металевих конструкціях, трубопроводах, проводах обладнання, внаслідок чого можуть виникати вторинні розряди на землю. Можливе занесення потенціалу блискавки в споруди через наземні й підземні комунікації і враження в них персоналу.

#### 4.4 Характеристика грозової діяльності

Атмосферними перенапругами називають перенапруги, що виникають на струмоведучих частинах електроустановки в результаті атмосферних електростатичних розрядів, які перевищують  $U_{дон}$ . Джерелом перенапруги є блискавка. При розробці грозозахисних заходів необхідно враховувати такі параметри: амплітуду струму блискавки, крутість імпульсів, частоту ураження об'єктів, що визначаються числом грозових днів у році  $N_{2.0}$  для даного району (для Харкова – це 40 г.д.). Вихідною величиною для розрахунку є число грозових годин у році  $N_{2.2}$ :  $N_{2.2} = 1,5 \cdot N_{2.0}$ .

Високі об'єкти через зустрічних лідерів збирають блискавки з більшої площі. Число ударів блискавки за 100 грозових годин у споруду довжиною  $A$ , шириною  $B$ , висотою  $H$  дорівнює

$$n_{y\partial} = 6,7 \cdot (A + 7H) \cdot (B + 7H) \cdot 10^{-6}. \quad (4.9)$$

Число ударів блискавки в 100 км повітряної ЛЕП за 100 грозових годин:

$$n_{y\partial} = 6,7 \cdot 100 \cdot 6h_{cp} \cdot 10^{-3} \approx 4h_{cp}, \quad (4.10)$$

де  $h_{cp} = h_{on} - \frac{2}{3} \cdot f$  – середня висота підвісу тросу або проводу, м;

$h_{on}$  – висота опори;  $f$  – стріла прогину проводу.

Річне число ударів блискавки у лінію довжиною  $l$  при числі грозових годин у році  $N_z$

$$n_{год} = n_{уд} \frac{l}{100} \cdot \frac{N_z}{100}. \quad (4.11)$$

### Запитання для самоконтролю

1. Назвіть параметри стандартного грозового імпульсу.
2. З яких складових формується термін розряду?
3. Що таке «вольт-секундна» характеристика (ВСХ) ізоляції?
4. Як залежить ВСХ ізоляції від однорідності електричного поля?
5. Дайте визначення поняттю «коефіцієнт імпульсу»?
6. Який механізм утворення лідерного каналу розряду ?
7. Який механізм формування головного розряду ?
8. Наведіть теорію формування зарядів блискавки.
9. Прокоментуйте формулу Лемке щодо напруги розряду.
10. Назвіть вражаючі фактори грозового розряду.

## 5 ЗАХИСТ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ВІД УДАРІВ БЛИСКАВКИ

### 5.1 Ефективність захисту електрообладнання

Ефективність захисту електрообладнання від ураження блискавкою характеризується середнім допустимим числом перекриття ізоляції внаслідок прориву блискавки в зону захисту -  $\beta_1$ , зворотних перекриттів при ударах в блискавковідводи -  $\beta_2$  і перекриттів внаслідок появи небезпечних перенапружень при набіганні імпульсів по лінії -  $\beta_3$ . Середнє число перекриттів ізоляції внаслідок прориву блискавки в зону захисту визначається за формулою

$$\beta_1 = n_{уд} \cdot P_{пр} \cdot P_{пер} \cdot D / 100, \quad (5.1)$$

де  $n_{уд}$  – число ударів блискавки в об'єкт (підстанцію) за 100 грозових годин;  $P_{пр}$  – імовірність прориву блискавки в зону захисту об'єкта;  $P_{пер}$  – імовірність перекриття ізоляції при ударі блискавки в провід;  $D_r$  – число грозових годин в місці розташування об'єкта.



Кількість зворотних перекриттів ізоляції при ударах блискавки в блискавковідводи дорівнює

$$\beta_2 = n_{yd}(1 - P_{np})P_{ze} \cdot D_c / 100, \quad (5.2)$$

де  $P_{ze}$  – імовірність зворотного перекриття при ударі в блискавковідвід, яка визначається критичним струмом  $I_{kp}$ , при якому стає можливим перекриття ізоляції.

Небезпечні імпульси перенапруги, що виникають внаслідок прориву блискавки через зону захисту і при зворотних перекриттях ізоляції розповсюджуються по лінії і можуть призвести до перекриття ізоляції електрообладнання. Середнє річне число перекриттів ізоляції електрообладнання набігаючими імпульсами визначають за формулою

$$\beta_3 = 4n_{тр} \left\{ P_a + (1 - P_a) \cdot \left[ \left( 4n_{оп} \cdot \frac{P_{оп}}{l} \right) + \left( 1 - \frac{4n_{оп}}{l} \right) \cdot P_{тр} \cdot \left( \frac{D_r}{100} \right) \cdot \left( m \cdot \frac{I_{сп}}{100} \right) \right] \right\}, \quad (5.3)$$

де  $l$  – довжина захищеного підходу до об'єкта;  $P_a$  – імовірність ураження струмопроводу;  $m$  – число проводів;  $P_{оп}$  – імовірність перекриття ізоляції на опорі при ударі блискавки в провід,  $P_{тр}$  – імовірність перекриття проміжку захисний трос-провід.

Показником грозостійкості об'єкта (підстанції) є число років безаварійної роботи, що визначається за формулою

$$M = 1 / \beta_1 + \beta_2 + \beta_3. \quad (5.4)$$

Вихідними даними для розрахунку блискавкозахисту від прямих ударів блискавки є призначення об'єкта, його значущість, ступінь вибухонебезпечності, конструктивні та технологічні особливості, габарити, електричний опір ґрунту. По відношенню до вимог блискавкозахисту усі об'єкти класифікують за трьома категоріями вибухо- і пожежонебезпеки. Узагальнено ці ознаки характеризуються наступним чином.

До *першої категорії* відносять об'єкти, в яких знаходяться відкриті вибухо- та пожежонебезпечні речовини, що можуть призвести до руйнувань та людських жертв.

До *другої категорії* відносять об'єкти, в яких вибухо- та пожежонебезпечні речовини знаходяться у вогнестійких посудинах, але можуть вивільнитися при аварії.

До *третьої категорії* відносять об'єкти, в яких такі речовини взагалі відсутні. Захист об'єктів від прямих ударів блискавки здійснюють за допомогою блискавковідводів, які поділяються на *стрижневі, тросові і комбіновані*. В останній час розробляють так звані *активні* блискавковідводи, найбільш ефективними з яких є апарати типу «Prevector» (Франція). Блискавковідвід – це споруда, вища за захисний об'єкт, яка сприймає прямі удари блискавки і відводить струми блискавки в землю завдяки системі заземлень. Кожен блискавковідвід містить три основних елемента: блискавкоприймач, струмопровід, заземлення. За характером взаємодії стрижневі й тросові блискавковідводи поділяються на одиночні, подвійні й багатократні. Об'єкти 1 категорії захищають окремо стоячими стрижневими або тросовими блискавковідводами. Допускається встановлення ізольованих блискавковідводів безпосередньо на захищені об'єкти. Об'єкти другої категорії захищають окремо стоячими або встановленими на спорудах неізольованими стрижневими або тросовими блискавковідводами, а також використанням в якості блискавкоприймача металеві покрівлі споруд. Захист об'єктів третьої категорії може бути здійснений блискавковідводами будь-яких модифікацій, в тому числі металевою сіткою, що укладається на покрівлю. У всіх випадках кожен тип блискавковідводів повинен мати не менше двох струмовідводів.

При проектуванні блискавковідводів треба враховувати теплову й електродинамічну дію блискавки. Інтеграл квадрата струму блискавки  $\int i_0^2 dt$  називається імпульсом квадрата струму, що визначає механічний вплив і нагрівання (розплавлення) провідників.

Відкриті розподільні пристрої підстанцій захищають стрижневими, а лінії електропередач – тросовими блискавковідводами.

У даний час нормовані зони захисту блискавковідводів висотою до 150 м являють собою конус з вершиною на висоті  $h_0 < h$ , переріз якого на висоті  $h_x$  має радіус  $r_x$  (рис. 5.1).

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  $H/h$  ( $H$  – відстань розряду блискавки;  $h$  – висота блискавковідводу). У деяких випадках для особливо важливих об'єктів зону захисту розраховують за умови імовірності прориву не більше за 0,005. 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. 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.

## 5.2 Зона захисту одиночного блискавковідводу

Зона захисту являє собою конус, що утворений шляхом обертання ламаної лінії навколо вертикали (І метод), або гіперболи (ІІ метод).

Послідовність побудови зони захисту по першому методу для блискавковідводів з висотою  $h \leq 60$  м наступна.

1. Відкладаємо від вертикалі відрізки  $CA'$ ,  $CB'$  на відстані  $0,75h$ ;
2. На висоті  $h_0 = 0,8 \cdot h$  ставимо точку  $O'$ ;
3. Точку  $O'$  з'єднуємо з А і В ( $CA = CB = 1,5h$ );
4. Точку  $O$  з'єднуємо з  $A'$  і  $B'$ .

Проводимо ламану лінію  $BDO$ , яка є твірною зони захисту.

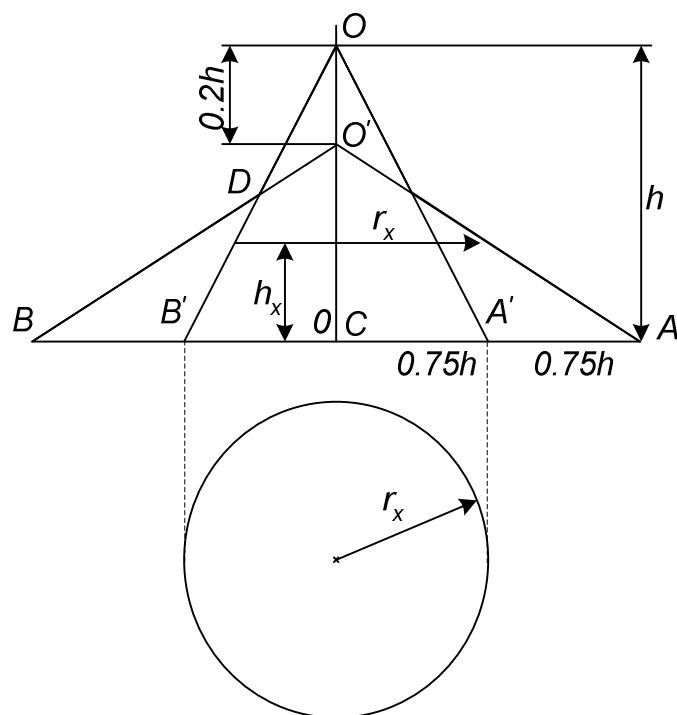


Рисунок 5.1 – Геометрична побудова зони захисту одиночного стрижневого блискавковідводу;  $h$  – висота блискавковідводу;  $h_x$  – висота споруди

Для визначення радіуса зони захисту  $r_x$  на будь-якій висоті  $h_x$  використовуємо формули

$$r_x = 1,5(h - 1,25h_x) \text{ при } 0 \leq h_x \leq \frac{2}{3}h; \quad (5.5)$$

$$r_x = 0,75(h - h_x) \text{ при } h_x > \frac{2}{3}h. \quad (5.6)$$

Вирішуючи ці рівняння відносно висоти  $h$ , одержимо при заданих значеннях  $r_x$  і  $h_x$  оптимальну висоту блискавковідводу в метрах

$$h_{opt} = \frac{r_x + 1,9h_x}{1,5}, \text{ і } h_{opt} = \frac{r_x + 0,75h_x}{0,75}. \quad (5.7)$$

Для блискавковідводів з висотою  $h \approx 60 \div 100$  зона захисту визначається, виходячи з лімітованого радіуса основи конуса  $r = 90$  м.

Тоді радіус зони захисту на висоті  $h_x$  визначають із співвідношень

$$r_x = 90(1 \div 1,25h_x/h) \text{ при } 0 \leq h_x \leq \frac{2}{3}h; \quad (5.8)$$

$$r_x = 45(1 - h_x/h) \text{ при } h_x > \frac{2}{3}h. \quad (5.9)$$

Визначення  $r_x$  за II методом для блискавковідводів  $h < 30$  м

$$r_x = h_a \frac{1,6}{1 + \frac{h_x}{h}}, \quad (5.10)$$

для  $h > 30$  м:

$$r_x = h_a \frac{8,8}{\left(1 + \frac{h_x}{h}\right) \sqrt{h}}. \quad (5.11)$$

### 5.3 Зона захисту подвійного стрижневого блискавковідводу

Зона захисту двох стрижневих блискавковідводів, розташованих на відстані  $L < 5h$ , більша за зону захисту двох окремих блискавковідводів і розраховується з відповідних геометричних побудов (рис. 5.2). Якщо стрижневі блискавковідводи знаходяться на відстані  $L > 5h$ , їх треба розраховувати як окремі.

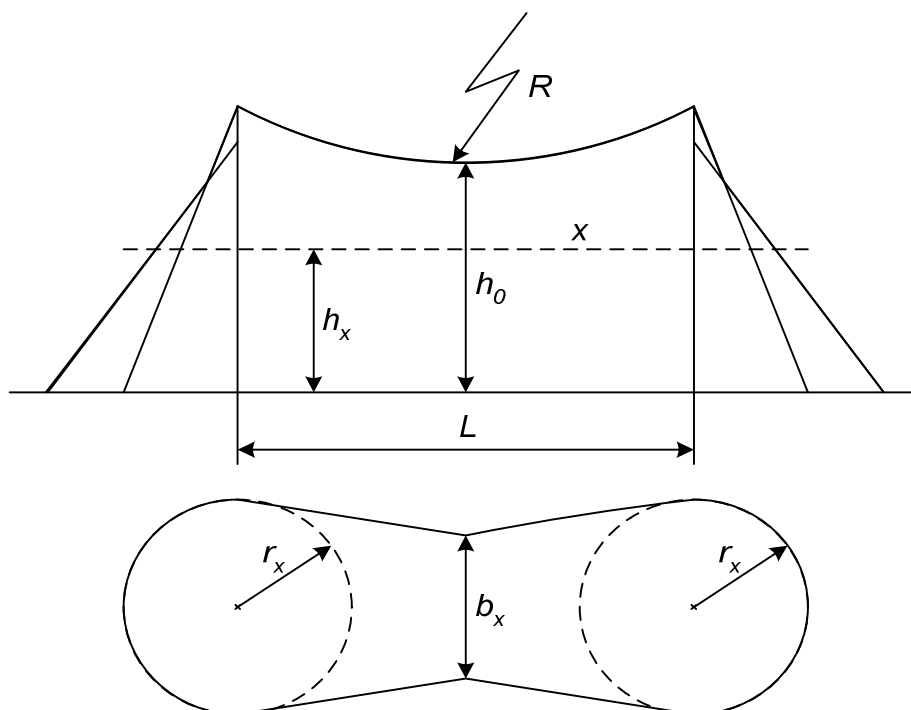


Рисунок 5.2 – Побудова зони захисту подвійного блискавковідводу

Блискавковідвід вважають подвійним якщо  $L/h \leq 5$ . Верхня межа зони захисту являє собою дугу радіуса  $R = 4h - h_0$ . Висоту  $h_0$  обчислюють за емпіричною формулою

$$h_0 = 4h - \sqrt{9h^2 - 0,25L^2}, \text{ м.} \quad (5.12)$$

Радіус кола  $R$  визначають таким чином:  $R = 4h - h_0$ . Якщо  $h_0$  і  $L$  відомі, то оптимальну висоту  $h$  блискавковідводу знаходять за формулою

$$h_{opt} = 0,571h_0 + \sqrt{0,183h_0^2 + 0,0357L^2}, \quad (5.13)$$

де  $h_0$  обчислюють виходячи з необхідної ширини зони захисту  $b_x$ , яка визначається висотою об'єкта, що захищається, і його розмірами в горизонтальній площині

$$b_x = 3(h_0 - 1,25h_x) \text{ при } 0 \leq h_x \leq \frac{2}{3}h; \quad (5.14)$$

$$b_x = 1,5(h_0 - h_x) \text{ при } h_x > \frac{2}{3}h. \quad (5.15)$$

Вирішуючи їх відносно  $h_0$ , знаходимо

$$h_0 = \frac{b_x + 3,75h_x}{3} \text{ і } h_0 = \frac{b_x + 1,5h_x}{1,5}. \quad (5.16)$$

Для побудови зони захисту подвійного блискавковідводу різної висоти спочатку будують зону захисту блискавковідводу більшої висоти і торцеву частину зони захисту другого блискавковідводу. Потім з вершини блискавковідводу меншої висоти проводять горизонтальну лінію до перетину з твірною першого і вважають точку перетину вершиною фіктивного блискавковідводу. Далі, як звичайно, для двох однакових блискавковідводів будують зону захисту внутрішньої області (рис. 5.3).

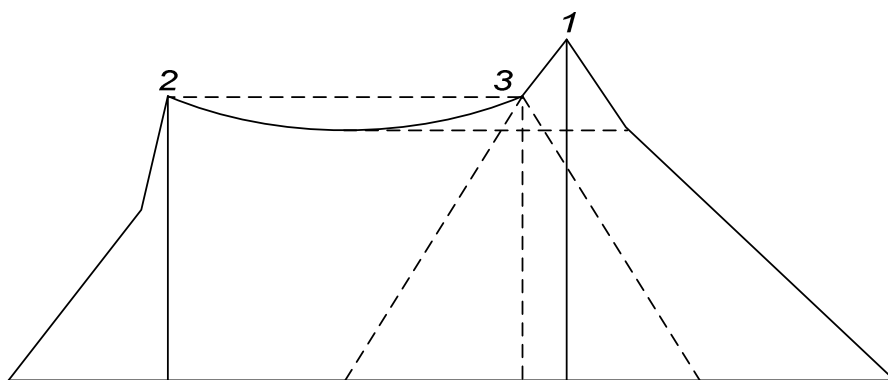


Рисунок 5.3 – Побудова зони захисту різновисотних блискавковідводів

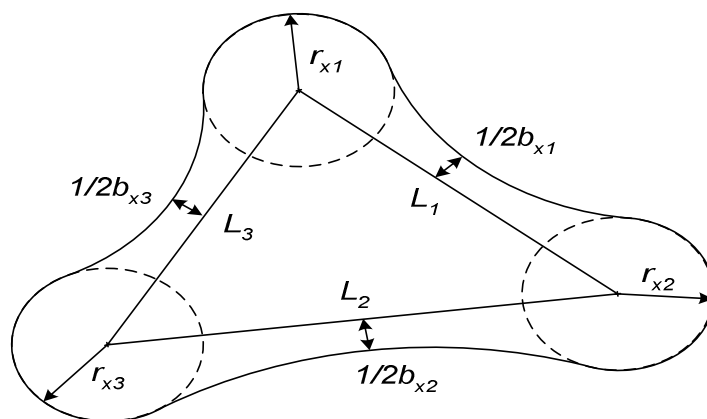


Рисунок 5.4 – Побудова зони захисту багаторазових блискавковідводів

Для розрахунку й побудови зовнішніх меж зони захисту використовують ті самі принципи, що й для поодиноких блискавковідводів. При цьому блискавковідводи рахують попарно як зони захисту подвійних блискавковідводів у такій послідовності: 1-2, 2-3, 3-1. При використанні 4-х і більше стрижневих блискавковідводів необхідне виконання додаткових умов:

- для споруд 1-ї і 2-ї категорій треба приймати  $h_0 \geq h_x$  для попарно взятих блискавковідводів за діагоналями багатокутника, утвореного одиничними блискавковідводами;
- для споруд 3-ї категорії допускається  $D \leq 5h_a$  ( $D$  – довжина діагоналі багатокутника, складеного одиничними блискавковідводами);

– для блискавковідводів висотою  $h > 30$  м значення  $D$  повинне бути зменшене на величину коефіцієнта  $p = 5,5/\sqrt{h}$ .

Умова не прориву блискавки в зону захисту має вигляд:  $D \leq 8h_a$ .

#### 5.4 Зона захисту тросових блискавковідводів

Розраховується першим методом таким чином

$$r_x = 1,25(h_{mp} - 1,25h_x) \text{ при } 0 \leq h_x \leq \frac{2}{3}h_{mp}; \quad (5.17)$$

$$r_x = 0,625(h_{mp} - h_x) \text{ при } h_x > \frac{2}{3}h_{mp}, \quad (5.18)$$

де  $h_{mp}$  – висота троса над об'єктом, що захищається,  $h_{mp} = h - f$ ;  
 $f$  – стріла прогину.

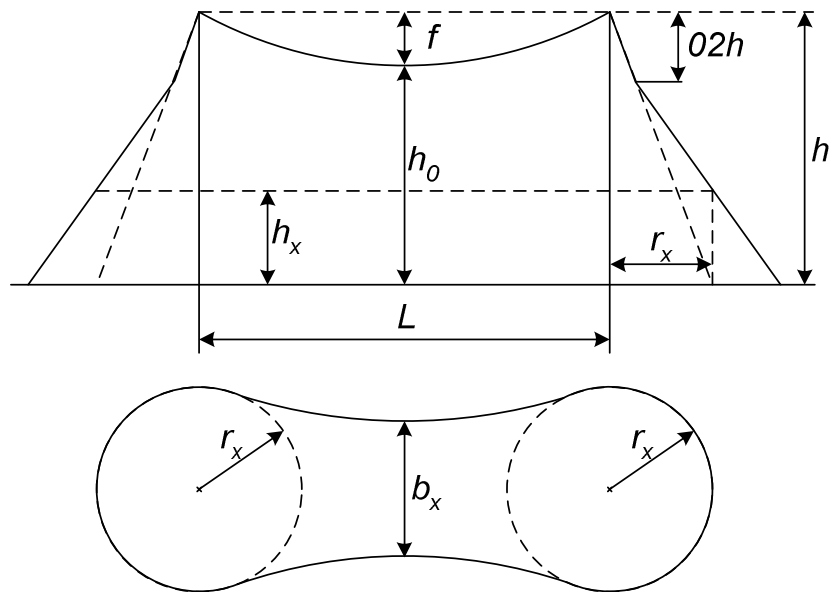


Рисунок 5.5 – Побудова зони захисту тросового блискавковідводу

Повна ширина зони захисту при  $h_x = 0$ , дорівнює  $2r_x = 2,5h_{mp}$ .

За другим методом радіус захисту  $r_x$  визначаємо за формулою

$$r_x = h_a \frac{1,2}{1 + h_x/h_{mp}}. \quad (5.19)$$



Важливим техніко-економічним фактором є температура, що визначає стрілу прогину. За  $T^{\circ}C_{\max}$ . приймають  $40^{\circ}C$ . Стрілу прогину в будь-якій ділянці прольоту визначають таким чином:

$$f_{np} = 4f \cdot \frac{l_1}{L} \left( 1 - \frac{l_1}{L} \right) - \text{при однакових рівнях підвісу.} \quad (5.20)$$

$$f_{np} = \frac{l_1}{L} \Delta h + 4f \cdot \frac{l_1}{L} \left( 1 - \frac{l_1}{L} \right) - \text{при різних рівнях ділянок підвісу.} \quad (5.21)$$

Тут  $\Delta h$  – різниця відміток підвісу троса, м;  $l_1$  – відстань від несучої конструкції з більшою висотою підвісу троса до розглянутої ділянки, м. Грозі передує вітер – трос відхиляється і об'єкт може бути уражений блискавкою. Відхилення троса визначається співвідношенням

$$\sin \varphi = \frac{\gamma_1}{\gamma_2}, \quad (5.22)$$

де  $\varphi$  – кут відхилення троса;  $\gamma_1$  – питоме навантаження на трос від тиску вітру ( $H/m \cdot mm^2$ );  $\gamma_2$  – питоме навантаження від власної маси троса і тиску вітру ( $H/m \cdot mm^2$ ).

Горизонтальна проекція відхилення троса в будь-якій ділянці прольоту в м

$$c = f_n \cdot \sin \varphi. \quad (5.23)$$

Слід враховувати і збільшення висоти блискавкоприймача  $h_{mp}$  при його відхиленні  $\Delta h_{mp}$  від вітру

$$\Delta h_{mp} = f_n - \sqrt{f_n^2 - c^2}. \quad (5.24)$$

Тоді висота тросового блискавкоприймача у відхиленому положенні дорівнюватиме

$$h'_{mp} = h_{mp} + \Delta h_{mp}. \quad (5.25)$$

## 5.5 Заземлення блискавковідводів

Усі металеві частини електроустановки, що можуть виявитися під напругою в результаті пошкодження ізоляції, повинні надійно з'єднуватися із землею. Розрізняють три види заземлень: – *захисне*, що гарантує

електробезпечність при замиканні струмоведучих частин на корпус електрообладнання; *робоче*, що призначене для забезпечення нормальної роботи електроустаткування (заземлення нейтралей трансформаторів, генераторів, дугогасильних котушок); *грозозахисне* – для захисту електрообладнання від перенапружень і блискавкозахисту різноманітних об'єктів. Звичайно заземлюючий пристрій виконує всі три функції. Для влаштування заземлення використовують природні й штучні заземлювачі.

Штучне заземлення – це сталевий пруток  $\varnothing 10$  мм або оцинкований  $\varnothing 6$  мм. Використовують також смугову сталь шириною 20÷40 мм і товщиною 4 мм. Розміщення заземлювачів повинно забезпечити рівномірний розподіл електричного потенціалу по всій площі, зайнятій електроустаткуванням.

Заземлювачі характеризуються величиною опору  $R_3$  землі для струму, що протікає.  $R_3$  залежить від геометричних розмірів і питомого опору ґрунту  $\rho$ . В установках 6÷35 кВ із незаземленою нейтраллю  $R_3$  завжди повинно бути:  $R_3 \leq 250/I_3$  для  $U > 110$  кВ.

Заземлюючий пристрій виготовляють з вертикальних стрижнів і горизонтальних смуг, що утворюють сітку з кроком не більше 30 м.

Опір вертикального заземлювача

$$R_3 = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left[ \frac{4l(2t+l)}{d(4t+l)} \right], \quad (5.26)$$

де  $l$  – довжина заземлювача;  $t$  – глибина залягання;  $b$  – ширина смуги;  $d$  – діаметр заземлювача.

Опір залізобетонного фундаменту

$$R = 1,7 \frac{\rho}{2\pi t} \ln \frac{4t}{b}. \quad (5.27)$$

Опір горизонтальної смуги

$$R = \frac{\rho}{2\pi d} \ln \frac{1}{5} \frac{l}{\sqrt{bt}}, \quad (5.28)$$

тут  $\rho = k \cdot \rho_{\text{вимір.}}$ , де  $\rho_{\text{вимір.}}$  – вимірне значення питомого опору ґрунту,  $k$  – сезонний коефіцієнт (при середній вологості  $k = 1,4$ , при підвищеній  $k = 2,6$ ).

При великих імпульсних напругах блискавки густина струму дуже велика і біля поверхні електродів створюються дуже високі напруженості поля  $E = j \cdot \rho$ , що перевершують пробивні напруги ґрунту. Внаслідок цього навколо електродів утворюється зона іскріння, що збільшує їхній ефективний розмір, тому опір заземлення  $R_z$  зменшується. Одночасно при швидкому наростанні імпульсу струму блискавки на індуктивному опорі заземлювача виділяється напруга, що обмежує відведення струму, тобто опір заземлення  $R_z$  зростає. Отже при постійному і імпульсному струмі опір заземлення  $R_z$  буде різним. Відношення імпульсного і стаціонарного опору  $\alpha_i = R_i / R_{cm}$  називається *імпульсним коефіцієнтом*. У результаті дії обох факторів  $R_{zi} \neq R_{cm}$ .

На межі іскрової зони (циліндр із  $r_{iz}$ ) напруженість електричного поля

$$E_{np} = j \cdot \rho = \frac{I}{2\pi \cdot r_{iz} l} \cdot \rho, \quad (5.29)$$

звідки випливає

$$r_{iz} = \frac{I \cdot \rho}{2\pi \cdot l \cdot E_{np}}. \quad (5.30)$$

Тоді імпульсний опір заземлення

$$R_i = \frac{\rho}{2\pi l} \cdot \ln \frac{2l}{r_{uz}} = \frac{\rho}{2\pi l} \cdot \ln \frac{4\pi l^2 E_{np}}{I \cdot \rho}, \quad (5.31)$$

а імпульсний коефіцієнт

$$\alpha_i = \frac{\ln(4\pi l^2 \cdot E_{np} / I \cdot \rho)}{\ln 2l/r}. \quad (5.32)$$

Аналіз протяжного горизонтального заземлювача дає такий вираз для імпульсного коефіцієнта

$$\alpha_i = 1 + \frac{L_0 l}{3\tau_\phi R}, \quad (5.33)$$

де  $L_0 = 0,2 \left( \ln \frac{l}{r} - 0,31 \right)$  – індуктивність одиниці довжини горизонтального

заземлювача.

Для заземлювача з  $n$  труб чи смуг його імпульсний опір:

$$R_i = \alpha_i \cdot R / \eta_i \cdot n, \quad (5.34)$$

де  $\eta_i$  – імпульсний коефіцієнт використання заземлювача, що враховує взаємне екранування електродів,  $\eta_i = (1 \div 0,75)$ .

Опір заземлювача у вигляді сітки, що складається з вертикальних електродів, об'єднаних горизонтальними смугами

$$R_3 = \rho \cdot \left( \frac{A}{\sqrt{S}} + \frac{1}{L + n \cdot l} \right), \quad (5.35)$$

тут  $L$  – сумарна довжина горизонтальних електродів;  $n$  і  $l$  – число і довжина вертикальних електродів;  $S$  – площа заземлювача;  $A$  – коефіцієнт (0,25 ÷ 0,44).

Для протяжних заземлювачів імпульсний коефіцієнт дорівнює

$$\alpha_i = \sqrt{\frac{1500\sqrt{S}}{(\rho + 320)(I_\sigma + 45)}}, \quad (5.36)$$

де  $S$  – сумарна площа електродів заземлювача, м<sup>2</sup>.

Струм блискавки  $I_\sigma$  створює падіння напруги на активному  $R_3$  й індуктивному  $L$  опорі струмовідводу. При крутості фронту  $a$ , на відстані  $l$  від заземлювача максимальний потенціал  $U_l$  у момент максимуму струму:

$$U_l = I_\sigma \cdot R_\sigma + a \cdot L_0 \cdot l, \quad (5.37)$$

де  $L_0$  – індуктивність одиниці довжини струмовідводу  $\approx 1,7$  мкГн/м.

При інженерних розрахунках прийнято:  $I_\sigma = 60$  кА,  $a = 30$  кА/мкс.

Відстань по повітрю  $l_n$  між заземлювачем і захищеним об'єктом при розрахунковому струмові і  $E_{\text{дон}} = 500$  кВ/м визначають за формулою

$$l_n \geq \frac{60R_i + 30 \cdot 1,7l}{500} \approx 0,12R_i + 0,1 \cdot l \quad (5.38)$$

Відстань в землі  $l_3$  між заземлювачем і найближчою ділянкою об'єкта, що захищається, при допустимій напруженості електричного поля в землі  $E_3 = 300$  кВ/м складає

$$l_3 = \frac{60R_i}{300} = 0,2R_i. \quad (5.39)$$

Отже,  $l_n$  повинно бути не менше 5 м, а  $l_3$  – не менше 3 м.

На підстанціях при встановленні блискавковідводів на порталах необхідно також узгоджувати імпульсні розрядні напруги ізоляторів з напругами, що виникають в місцях приєднання їх до portalу.

Запитання для самоконтролю

1. Природа формування і виникнення грозового розряду.
2. Назвіть уражаючі фактори грозового розряду.
3. Як визначити величину струму в каналі грозового розряду?
4. Чем визначається число ударів блискавки в ЛЕП?
5. Що таке «зворотне перекриття», коли воно виникає?
6. Як класифікуються об'єкти за ступенем захисту від блискавки?
7. Як захищають об'єкти від прямих ударів блискавки?
8. Чим характеризують ефективність захисту від ударів блискавки?
9. Наведіть принцип розрахунку зони захисту блискавковідводу.
10. Особливості розрахунку захисту подвійним блискавковідводом.
11. Принцип розрахунку захисту тросовим блискавковідводом.
12. Назвіть спосіб розрахунку грозозахисного заземлення.
13. Що таке «іскровий ефект», та як він впливає на величину опору заземлення?

## 6 РОЗЯДИ ВЗДОВЖ ПОВЕРХНІ ТВЕРДИХ ІЗОЛЯТОРІВ

### 6.1 Вплив поверхні твердого діелектрика на розвиток розряду

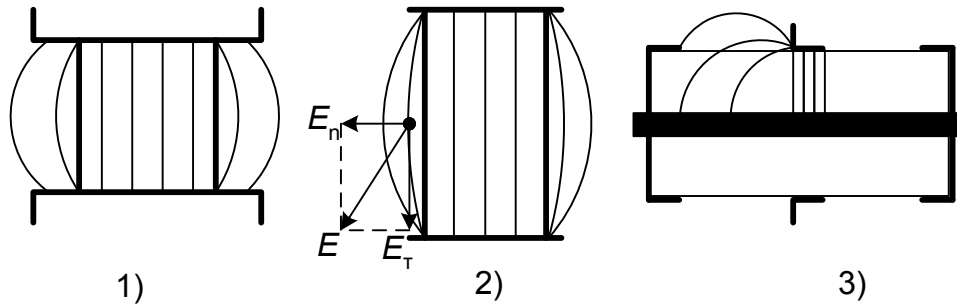


Рисунок 6.1 – Характерні види електричних полів ізоляторів

Перший (1) і другий (2) варіанти – моделюють опорні ізолятори. Для варіанта (1) переважає тангенційна (дотична до поверхні) складова напруженості електричного поля, яке є відносно однорідним. Тут корона відсутня і величина розрядної напруги досить висока. Але без діелектрика електрична міцність більша, тому що наявність його спотворює поле, а поверхня абсорбує вологу і бруд, які сприяють розвитку розряду. Під дією електричного поля молекули води дисоціюють на позитивні  $H_+$  і негативні  $O_-$  іони, які переміщуються до відповідних електродів, збільшуючи напруженість на поверхні діелектрика. Наявність мікрозазорів між діелектриком і електродами також збільшує напруженість в них поля завдяки різниці діелектричних проникностей повітря і твердого діелектрика. Збільшення напруженості в мікрозазорах призводить до виникнення там іонізаційних процесів з утворенням електронів і іонів, які зменшують напругу перекриття міжелектродного проміжку.

Розряд по лінії розділу напруженості (повітря-фарфор, мастило-папір) та ін. називається *поверхневим (ковзним)* розрядом. Ковзний розряд поблизу поверхні (1) розвивається без істотної взаємодії з нею, тому вид ізоляції мало впливає на величину розрядної напруги. Для збільшення розрядної напруги ізолятора використовують малогігроскопічні діелектрики, наприклад,

глазурований фарфор. Для запобігання утворенню мікрозазорів між діелектриком і електродами застосовують еластичні мастики.

У варіанті (2) поле сильно неоднорідне і тангенційна складова напруженості електричного поля на поверхні діелектрика  $E_t$  набагато більша за нормальну складову  $E_n$ . Тому розрядна напруга набагато менша, ніж в однорідному полі. При сильній неоднорідності поля в цій ізоляційній конструкції виникає коронний розряд, який супроводжується утворенням озону й оксидів азоту, які завдають шкоди ізоляції. Особливо небезпечна стримерна форма коронного розряду, внаслідок високої температури у каналі стримера, що може призвести до термічного розкладання діелектрика і утворення провідних каналів – *треків*.

У конструкції (3) електричне поле також неоднорідне, але переважає нормальна складова. Наявність великої нормальної складової напруженості електричного поля  $E_n$  сприяє зближенню каналу стримера з поверхнею діелектрика, що збільшує імовірність його пошкодження. Тут при розвитку розряду виникає корона біля голівки і фланця ізолятора і електрична міцність ще менша, ніж у варіанті (2). Канали стримерів уздовж поверхні ізолятора мають велику ємність відносно внутрішнього електрода, тому через них проходять великі струми, які стимулюють виникнення термічної іонізації. Термічно іонізовані канали вздовж поверхні ізолятора мають назву *каналів ковзного розряду*.

Оскільки провідність каналу розряду значно більша за провідність каналу стримера, то падіння напруги на ньому менше, і вся напруга виявляється прикладеною до непровідної частини міжелектродного проміжку. Це призводить до подовження каналу ковзного розряду і повному перекриттю ізолятора по його поверхні.

У загальному випадку (за Теплером) довжина ковзних розрядів залежить від напруги між електродами  $U$ , ємності каналу стримера  $C$ , зміни напруги в часі

$$l_{ск} = A \cdot C^2 \cdot U^{5.4} \sqrt{\frac{dU}{dt}}, \quad (6.1)$$

тут  $A$  – коефіцієнт, що визначається експериментом;  $C$  – питома поверхнева ємність (ємність одиниці поверхні діелектрика),  $\Phi/\text{см}^2$ ,  $U$  – прикладена напруга, кВ.

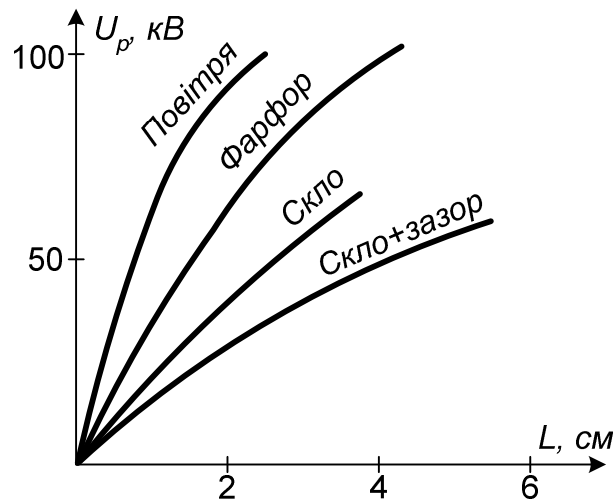


Рисунок 6.2 – Залежність поверхневої розрядної напруги від відстані між електродами

Підставимо у формулу (6.1) замість значення  $l_{ск}$  відстань між електродами по поверхні діелектрика  $L$  і знайдемо величину напруги перекриття ізолятора  $U_p$ . Приймаючи:  $C = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0}{d} S$ , де  $S$  – площа поверхні ізолятора,  $d$  – товщина діелектрика,  $\frac{dU}{dt}$  – крутизна імпульсу напруги, тоді

$$U_p = A \cdot L^{0.2} \left( \frac{d}{\epsilon \epsilon_0} \right)^{0.4} \cdot 1/S^{0.4}. \quad (6.2)$$

Звідки витікає, що збільшення довжини ізолятора мало підвищує розрядну напругу (рис. 6.2), більше впливає його діаметр. Тому для підвищення  $U_p$  прохідних ізоляторів зменшують питому поверхневу ємність за



рахунок збільшення діаметра ізоляторів біля фланця, з якого можна чекати початок розвитку розряду. Необхідно також використовувати матеріали з малою діелектричною проникністю  $\epsilon$ , застосовувати напівпровідникові плівки між фланцем і діелектриком. При постійній напрузі питома поверхнева ємність практично не впливає на розвиток розряду і поверхнева розрядна напруга ізолятора наближається до розрядної напруги повітряного проміжку:

$$U_{p.повітря} \approx U_{p.діелектрика} \cdot$$

## 6.2 Розряд по зволоженій і забрудненій поверхні ізоляторів

У промислових районах із забрудненою атмосферою, де випадки містять багато розчинних та здатних до дисоціації речовин, електропровідність шару бруду на поверхні ізоляторів призводить до різкого зниження їх електричної міцності. Утворення підсушених ділянок на поверхні ізолятора сильно спотворює електричне поле, в результаті чого утворюються часткові дуги, а потім відбувається і суцільне перекриття міжелектродного проміжку. Величина *мокророзрядної* напруги суттєво залежить також і від геометричної форми ізолятора, тому їх конструюють так, щоб нижні поверхні не змочувалися опадами, що обмежує *струм витоку* і підвищує мокророзрядну напругу.

Електричну міцність гірлянди ізоляторів під дощем характеризують середньою мокророзрядною напругою

$$E_{mp} = \frac{U_{mp}}{n \cdot H}, \quad (6.3)$$

де  $H$  – висота одного ізолятора гірлянди;  $n$  – число ізоляторів в гірлянді;

$U_{mp}$  – мокрозарядна напруга гірлянди.

$E_{mp}$  для тарілчастих ізоляторів змінюється від 2 до 2,6 кВ/см залежно від типу ізоляторів. При комутаційних імпульсах  $U_{mp}$  може бути в 1,5 рази більше, ніж при частоті мережі 50 Гц, що пояснюється короткотерміновим впливом напруги і нетривалим розвитком теплових процесів.

При змінній напрузі діюче значення напруги ковзного розряду дорівнює

$$U_{cp} = \frac{1,36 \cdot 10^{-4}}{C_n^{0,44}} \text{ (кВ)}, \quad (6.4)$$

для плоского діелектрика:

$$C_n = \frac{8,86 \cdot 10^{-14} \cdot \varepsilon}{d} \text{ (Ф/см}^2\text{)}, \quad (6.5)$$

для випадку (3)

$$C_n = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{r_2 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{8,86 \cdot 10^{-14}}{r_2 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}}, \quad (6.6)$$

де  $r_1, r_2$  – внутрішній і зовнішній діаметри прохідного ізолятора.

### 6.3 Часткові дуги (розряди)

В умовах експлуатації поверхня ізоляторів забруднюється, а дощ частково змиває бруд. Під дією робочої напруги по зволоженій поверхні протікає струм витoku, що інтенсивно підігріває і підсушує поверхню ізолятора. Оскільки забруднення по поверхні ізолятора розподілене нерівномірно, то щільність струму витoku на окремих ділянках поверхні різна і нагрів відбувається також нерівномірно. Якщо в якійсь частині поверхні провідна плівка випарилася раніше, то в результаті до невеликої ділянки поверхні може бути прикладена значна напруга, що викликає так звані *часткові* (ковзні) дуги з проходженням струму витoku:  $I_g = U/R_g$ , тут  $R_g$  – опір витoku по поверхні ізолятора. Для циліндричного ізолятора діаметром  $D$  опір  $R_g = \rho L_g / (\pi \cdot \Delta D)$ . Тоді струм витoku по поверхні ізолятора дорівнює

$$I_g = \frac{U \cdot \pi \cdot \Delta D}{\rho \cdot L_g}, \quad (6.7)$$

де  $\rho$  – питомий об'ємний опір;  $\Delta$  – товщина шару забруднення;  $L_g$  – довжина шляху витoku ізолятора.

Тобто розрядна напруга ізолятора зростатиме зі збільшенням довжини шляху витoku і зменшенням діаметра ізолятора. Чим менший струм витoku, тим

вища розрядна напруга ізоляторів. Таким чином важливою характеристикою опорної ізоляції є *довжина шляху витоку*.

Питома довжина шляху витоку – це довжина шляху витоку  $L_{вт}$  на 1 кВ прикладеної найбільшої робочої напруги

$$\lambda = \frac{L_{\text{в}}}{U_{\text{нр}}} \text{ (см/кВ)}. \quad (6.8)$$

Кількість підвісних ізоляторів у гірлянді визначають за формулою:

$$\lambda_{\text{норм}} = \frac{n \cdot L_{\text{в}}}{U_{\text{нр}}}, \quad (6.9)$$

де  $\lambda_{\text{норм}}$  – нормативна питома довжина витоку;

$\lambda_{\text{норм}}$  – для чистої атмосфери = 1,3÷1,9 см/кВ;

$\lambda_{\text{норм}}$  – для забрудненої = 2,25÷4 см/кВ.

*Приклад.* Визначити число ізоляторів у гірлянді для чистої атмосфери

$\lambda_{\text{норм}} = 1,3$  см/кВ; для забрудненої:  $\lambda_{\text{норм}} = 3$  см/кВ.

Для скляних ізоляторів ПС-20-10 ( $l_{\text{ут}} = 32$  см);  $U = 110$  кВ;

$U_{\text{нр}} = 1,15 \cdot 110 = 126,5$  кВ;

$$\lambda_{\text{гирл}} = \frac{n \cdot l_{\text{ут}}}{U_{\text{нр}}} \Rightarrow n = \frac{\lambda_{\text{н}} \cdot U_{\text{нр}}}{l_{\text{ут}}} = \frac{1,3 \cdot 126,5}{32} = 5,4 \approx 6 \text{ ізол.};$$

$$\lambda_{\text{гирл}} = \frac{3 \cdot 126,5}{32} = 12 \text{ ізол.}$$

#### 6.4 Вибір ізоляторів залежно від зовнішнього середовища

Визначальним при виборі ізолятора є забезпечення надійної роботи в умовах дощу, туману, роси, в сполученні із забрудненням поверхні. Мокророзрядна напруга ізоляторів залежить від характеристик забрудненого шару (товщини і питомого опору). Вона пропорційна довжині шляху витоку ізолятора  $L_{\text{в}}$ , (найменша відстань по поверхні між електродами). Оскільки забруднення нерівномірне і на окремих ділянках розряд може розвиватися в

повітрі, то *вологорозрядна* напруга пропорційна не  $L_6$ , а ефективній довжині шляху витоку

$$L_{\text{еф}} = \frac{L_6}{k}, \quad (6.10)$$

де  $k \geq 1$  – поправочний коефіцієнт ефективності ізолятора, визначають експериментально. Для підвісних тарілчастих ізоляторів він може бути оцінений за емпіричною формулою

$$k = 1 + 0,5 \cdot \left( \frac{L_6}{D} - 1 \right), \quad (6.11)$$

тут  $D$  – діаметр ізолятора. Для підвісних ізоляторів  $k \sim 1 \div 1,3$ .

Важливою характеристикою надійності ізоляторів при робочій напрузі є питома ефективна довжина шляху витоку, що нормується для різних умов і напруги  $U_{\text{роб}}$ .

$$\lambda_{\text{еф}} = \frac{L_{\text{еф}}}{U_{\text{найб.роб}}}. \quad (6.12)$$

Для надійної експлуатації при робочій напрузі  $U_p$  геометрична довжина шляху витоку  $L_6$  ізолятора визначається з умови:

$$L_6 \geq k \cdot \lambda_{\text{еф}} \cdot U_{\text{найб.роб}}. \quad (6.13)$$

Тоді число ізоляторів у гірлянді дорівнює:

$$n \geq \frac{k \cdot \lambda_{\text{еф}} \cdot U_{\text{найб.роб}}}{L_{61}}, \quad (6.14)$$

де  $L_{61}$  – довжина шляху витоку одного ізолятора.

Нормована питома ефективна довжина шляху витоку  $L_6$  забезпечується збільшенням у гірлянді числа ізоляторів або використанням спеціальних брудостійких ізоляторів, що мають сильно розвинуту поверхню

Якщо у звичайних ізоляторах  $L_6 \approx 28 \div 42$  см, то у брудостійких  $L_6 \approx 40 \div 57$  см.

Основним заходом з підвищення експлуатаційних характеристик ізоляторів в умовах інтенсивного забруднення і зволоження, є їх періодичний обмив і очищення, а також застосування гідрофобних покриттів. Найменш

трудомістким заходом є обмив ізоляторів водою, але не всі види забруднень піддаються такому способу очистки. Гідрофобні покриття у вигляді твердих полімерних плівок або в'язких покриттів (кремнійорганічний вазелін КВ-3) дають змогу більш якісно здійснювати очистку й збільшити інтервал між ними. Більш ефективними є в'язкі покриття, оскільки вони не тільки відштовхують вологу, але й поглинають частки бруду, не даючи їм утворювати провідного шару. Звичайно гідрофобні покриття зберігають дієздатність 1,5 ÷ 2 роки.

### 6.5 Дуговий розряд

В електроустановках при комутації великих робочих струмів розбіжність контактів супроводжується виникненням дуги – розряду з великою густиною струму (до 100 кА/см<sup>2</sup>). Дугові розряди супроводжують і розвинуті поверхневі розряди – перекриття ізоляції електроустановки.

У дузі є три характерних ділянки: *прикатодна*, *стовп дуги* і *прианодна*. Довжина прикатодної ділянки – порядку довжини вільного пробігу електрона – 10<sup>-4</sup> ÷ 10<sup>-5</sup> см., довжина прианодної ділянки – приблизно така ж. Величина напруги у прикатодній ділянці  $U_k$  приблизно відповідає напрузі іонізації газу, в якому горить дуга:

$U_k \sim 8 \div 12$  В, – залежно від матеріалу катода;  $U_a \sim 1 \div 2$  В. Падіння напруги на стовпі дуги:

$$U_c = E_s \cdot L_c, \quad (6.15)$$

а напруженість в каналі розряду:  $E_s \sim 15 \div 25$  В/см,

де  $L_c$  – довжина стовпа дуги, см.

Нерівності поверхні катода збільшують напруженість електричного поля у стовпі дуги. Відрив вільних електронів від катода під дією електричного поля називається *автоелектронною емісією*.

При значній густині струму дуги температура поверхні катода досягає температури випару металу катода й енергія електронів стає настільки

великою, що дозволяє їм вийти з катода. Це явище називається *термоелектронною емісією*.

Стовп дуги являє собою сильно іонізований об'єм газу, що складається з позитивних та негативних іонів і називається плазмою, яка характеризується дуже високою температурою - від 5000 до 25000 К. Горіння дугового розряду є вкрай негативним явищем, оскільки пов'язано з великими втратами електричної енергії і можливим руйнуванням металевих частин електрообладнання.

Запитання для самоконтролю

1. Що таке поверхневий розряд, механізм його утворення?
2. Що таке нормальна й тангенційна складова електричного поля?
3. Наведіть формулу Теплера і поясніть її зміст.
4. Вплив питомої поверхневої ємності на розрядну напругу.
5. Як визначити величину мокророзрядної напруги гірлянди?
6. Що таке «часткові дуги», який механізм їх утворення?
7. Вплив атмосферних факторів на величину розрядної напруги.
8. Вплив довжини шляху витoku на електричну міцність ізолятора?
9. Як розрахувати число ізоляторів у гірлянді?
10. Назвіть негативні діючі фактори дугового розряду.

## 7 РОЗРЯДИ В РІДКИХ ДІЕЛЕКТРИКАХ

### 7.1 Фізична природа розряду в рідких діелектриках

Рідкі діелектрики розділяються на природні, до яких відносяться різноманітні масла, і синтетичні (кремнійорганічні сполуки). Електрична міцність масла (трансформаторного, кабельного, конденсаторного) наближається до міцності твердих діелектриків (~ 200 кВ/см). Крім того, рідкі діелектрики мають хорошу теплопровідність, що дозволяє ефективно відводити тепло від струмопровідних частин електрообладнання, які в процесі роботи

нагріваються струмами навантаження та витоків. Ще одна їх цінна якість полягає у спроможності гасити дугу, яка виникає при комутації обладнання, або при пошкодженнях ізоляції. Застосування рідких діелектриків обмежує безпосередній вплив повітря і вологи на струмопровідні елементи конструкції електрообладнання.

Синтетичні діелектрики (Совол –  $C_{12}H_{10}$ , Совтол – це совол + + трихлорбензол) мають підвищену робочу температуру і високу нагрівостійкість й вогнебезпечність. Електрична міцність  $\sim 200$  кВ/см. Кремнійорганічні діелектрики, крім нагрівостійкості й негорючості, мають температуру замерзання  $-80^{\circ}C$  та електричну міцність  $\sim 250$  кВ/см. Електропровідність чистих рідких діелектриків характеризується питомим об'ємним опором  $\rho_v \sim 10^{10} \div 10^{12}$  Ом·м.

Вплив електричного поля  $E$  на рідкий діелектрик призводить до *дисоціації* його і домішків на позитивні й негативні іони. При підвищенні температури дисоціація прискорюється. При збільшенні напруги в однорідних електричних полях спочатку виникають окремі пробої в найбільш слабких місцях рідкого діелектрика з наступним переходом в стійкий дуговий розряд при подальшому підвищенні напруги до розрядної. У нерівномірних полях спочатку виникає стримерна корона біля одного або обох електродів, яка при подальшому підвищенні напруги подовжується і переходить потім у стійкий дуговий розряд.

Відповідно до існуючої теорії розряду в рідких діелектриках іони під дією нормальної складової електричного поля збільшують силу нормального тиску на рідину уздовж траєкторії руху і за рахунок тертя, нагрівають ділянку рідини, утворюючи газові бульбашки, які сприяють розвитку розряду. Існуючі теорії розряду не дозволяють оцінити вірогідність їх виникнення кількісно, тому орієнтуються на експериментальні дані.

Електрична міцність рідких діелектриків різко зменшується при забрудненнях та зволоженні. Під дією електричного поля частинки забруднення і краплинки вологи втягуються в зону підвищених градієнтів, утворюючи

провідні ланцюжки в напрямку силових ліній. При перекритті вздовж такого ланцюжка розрядна напруга різко зменшується.

Волога в маслі може знаходитись в розчинному стані, у вигляді емульсії або відстою на дні бака трансформатора. Якщо молекулярно-розчинна вода мало впливає на електричну міцність масла, то навіть частки емульсійної води значно знижують його міцність. Це пояснюється поляризацією краплинок вологи в електричному полі і утворенням внаслідок цього провідних місточків, по яких відбувається розряд. У рідких діелектриках проявляється *ефекти полярності і бар'єрний*

$$U_p \approx 28,8 \cdot S^{0,71} \text{ кВ (} S \text{ – відстань між електродами, см).}$$

Для підвищення розрядних напруг  $U_p$  рідких діелектриків використовують бар'єри, тверді покриття і ізолювання електродів.

Бар'єр не проникний для іонів рідини, що осаджуються на його поверхні, заряджаючи його і вирівнюючи за рахунок цього електричне поле. Розглянемо вплив бар'єру на електричну міцність проміжку з плоскими електродами (рис. 7.1).

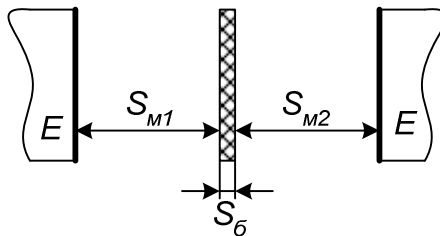


Рисунок 7.1 – Схема міжелектродного проміжку з бар'єром

Без бар'єра напруженість у проміжку  $E_m = \frac{U}{S}$ , і розрядна напруга:

$$U = E_m \cdot S; \quad \text{з бар'єром} \quad S_m = S_{M1} + S_{M2} + S_b,$$

$$\frac{E_m}{E_b} = \frac{\epsilon_b}{\epsilon_m}; \quad (7.1)$$

тоді розрядна напруга

$$U = E_m \cdot S_m + E_b \cdot S_b; \quad S = S_m + S_b. \quad (7.2)$$



Приймаючи  $\epsilon_m/\epsilon_\delta \sim 0,5$  і замінюючи  $S_m = S - S_\delta$  отримаємо:

$$E_m = \frac{U}{S - 0,5 \cdot S_\delta}. \quad (7.3)$$

Таким чином видно, що напруженість у маслі з бар'єром вища, ніж без нього. Розрядна напруга проміжку дорівнює:  $U_\delta = E_m \cdot S \cdot (1 - r)$ ; тут  $r$  – частка товщини бар'єра  $S_\delta$  від загальної відстані  $S$ . При відсутності бар'єра розрядна напруга:  $U = E_m \cdot S$ , тобто діелектрична міцність вища з бар'єром на  $30 \div 50\%$ . Якщо  $r = 1/3 \div 1/6$ , то

$$U_{\delta max} = 40 \left( 1 + \frac{2,14}{\sqrt{S}} \right) \cdot S, \text{кВ}. \quad (7.4)$$

Бар'єри найбільш ефективні, якщо розташовані нормально до силових ліній електричного поля. У трансформаторах використовують електрокартон товщиною  $2 \div 3$  мм і покривають струмопроводи електрополімерами: полівінілбутіралем або шарами паперової стрічки.

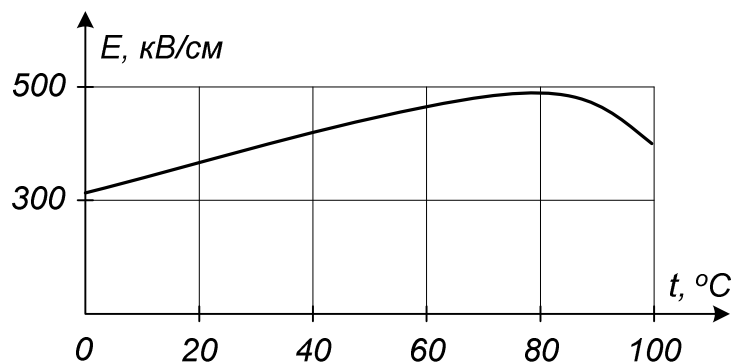


Рисунок 7.2 – Залежність пробивної напруги масла від температури

При збільшенні температури від 60 до 80 °C електрична міцність зростає завдяки переходу води в молекулярний стан, а далі зменшується внаслідок появи пухирців пари в маслі (рис. 7.2).

## 7.2 Комбінована ізоляція

Практика експлуатації електрообладнання свідчить, що найбільш повно вимогам до ізоляційних конструкцій відповідає ізоляція, що складається з декількох матеріалів, які доповнюють властивості один одного, та виконують різні функції у процесі роботи. Це, насамперед, тверді діелектрики, які мають необхідну механічну й електричну міцність. Однак вони мають низьку теплопровідність і не забезпечують надійного з'єднання з струмоведучими частинами електрообладнання без повітряних зазорів, де можлива поява часткових розрядів. Ці недоліки можна усунути, якщо в комбінації з твердими діелектриками використовувати гази або рідкі діелектрики, які спроможні заповнювати ізоляційні проміжки будь-якої величини і конфігурації. Крім того, рідкі діелектрики, маючи високу теплопровідність, використовуються в системах інтенсивного охолодження струмоведучих частин електрообладнання. Прикладом комбінованої ізоляції є масло-бар'єрна (МБІ) ізоляція, що складається з мінерального масла і кабельного паперу або електрокартону.

МБІ використовують як головну ізоляцію в силових трансформаторах, автотрансформаторах і реакторах, між обмотками різної напруги, а також між обмотками і заземленими елементами конструкції електрообладнання напругою від 10 до 1150 кВ. Для збільшення електричної міцності МБІ в масляних проміжках встановлюють бар'єри з електрокартону товщиною 2÷3 мм і покривають електроди полімерними плівками або паперовими стрічками. Наявність бар'єру в масляному проміжку збільшує напруженість електричного поля на 5÷7 % (завдяки більшій діелектричній проникності картону, ніж масла), але збільшує електричну міцність МБІ на 35 ÷ 50 %. Недоліком її є менша, ніж у паперово-масляної ізоляції електрична міцність, пожежо- та вибухонебезпечність, необхідність захисту від зволоження.

Іншим видом комбінованої ізоляції є паперово-масляна ізоляція, (ПМІ), що складається із шарів кабельного й конденсаторного паперу просоченого

дегазованим мінеральним маслом. ПМІ має високу електричну міцність  $\sim 600$  кВ/см, малі діелектричні втрати ( $\text{tg}\delta = 0,003-0,005$ ), але і малу допустиму робочу температуру  $\sim 90^\circ\text{C}$ . Використовується ПМІ в електрообладнанні надвисокої напруги від 110 до 1150 кВ.

Запитання для самоконтролю

1. Види й класифікація рідких діелектриків.
2. Наведіть функціональні характеристики рідких діелектриків.
3. Поясніть механізм розвитку розряду в рідких діелектриках.
4. Як впливає волога на електричну міцність масла?
5. Поясніть вплив бар'єру на величину розрядної напруги масла.
6. Як впливає температура на діелектричні характеристики масла?
7. Що таке комбінована ізоляція та які її властивості?
8. Де використовують комбіновану ізоляцію?

## 8 ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

### 8.1 Внутрішня і зовнішня ізоляція електрообладнання

Внутрішня ізоляція – це ділянки електроустаткування, заповнені різними діелектричними матеріалами. Ізоляційні проміжки в атмосферному повітрі – це зовнішня ізоляція. Доцільність застосування в установках високої напруги твердих діелектриків обумовлена їх значно (у 5÷10 разів), більшою, ніж у газових діелектриків електричною міцністю, що дозволяє різко скоротити відстань між струмоведучими частинами і зменшити габарити устаткування. Крім того, тверді діелектрики виконують функцію механічного кріплення провідників і відведення тепла. У високовольтних установках тверді діелектрики можуть використовуватись окремо або входити до складу комбінованої ізоляції. Тверда ізоляція повинна витримувати дію сильних електричних полів, підвищену температуру, механічні навантаження, забруднення, зволоження і комплексну сумісну дію цих факторів. Вона

повинна забезпечувати високу короточасну і довготривалу електричну міцність, мати високі напруги пробою, бути стійкою до часткових розрядів і запобігати появі газових включень у процесі роботи. Ізоляція повинна мати малі діелектричні втрати, високу нагрівостійкість і хорошу теплопровідність, щоб уникати теплового пробою при тривалій дії підвищеної напруги.

## 8.2 Основні властивості внутрішньої ізоляції

До діелектричних матеріалів висуваються високі вимоги у щодо їх електричних, теплових, механічних та інших властивостей.

Діелектрик, таким чином, повинен забезпечувати високу короточасну й тривалу електричну міцність, тобто мати комплекс властивостей, у тому числі:

- високі пробивні напруги;
- малі діелектричні втрати (визначають напругу теплового пробою);
- стійкість до впливу часткових розрядів;
- відсутність газових включень і їх виникнення у процесі роботи.

*Теплові властивості* діелектриків – теплопровідність визначає припустимі робочі струми, струми перевантаження, припустимі температури роботи електрообладнання, пожежо- і вибухобезпечність.

*Механічна міцність* визначає припустимі навантаження, що виключають розтріскування, розшарування, виникнення дефектів ізоляції.

*Екологічність*: не повинні утворювати при експлуатації токсичних продуктів, а при утилізації – не забруднювати середовище.

*Не дефіцитність і технологічність*.

*Спеціальні вимоги* (наприклад, діелектрики для силових конденсаторів повинні мати підвищену діелектричну проникність).

Усі групи вимог є головними і недотримання кожного з них призводить до виходу з ладу устаткування або є економічно й екологічно неприйнятним.

Провідність твердих діелектриків, що мають іонну кристалічну структуру, пов'язана з дією напруги, внаслідок чого іони зриваються з вузлів кристалічних ґраток і створюють *іонну* провідність.

Аморфні органічні тверді діелектрики (смоли, бітуми) мають *домішкову* провідність за рахунок дисоціації молекул на іони.

Важливою характеристикою твердих діелектриків є залежність електропровідності  $\sigma = f(T^\circ)$  і електричної міцності  $U_p$  від температури: при підвищенні температури  $T$  збільшується енергія електронів і іонів, внаслідок чого провідність  $\sigma$  зростає, а електрична міцність падає (рис. 8.1). Залежність  $\sigma$  від температури має експонентний характер:

$$\sigma = A \cdot e^{\frac{B}{T}}; \text{ або: } \sigma = A_1 \cdot e^{\frac{B_1}{T}} + A_2 \cdot e^{\frac{B_2}{T}}, \quad (8.1)$$

де  $A, B$  – константи, що залежать від властивостей конкретного діелектрика.

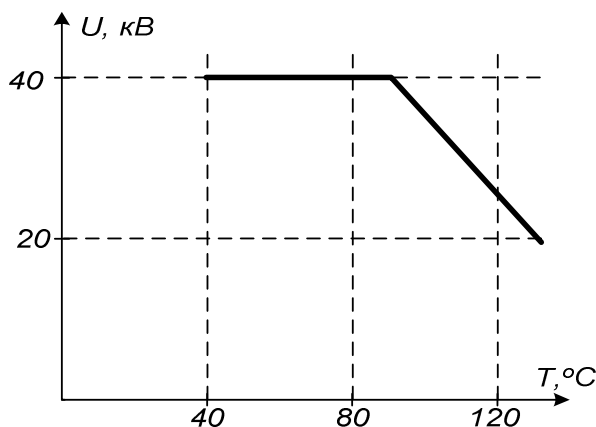


Рисунок 8.1 – Залежність електричної міцності фарфору від температури

### 8.3 Механізми пробою твердих діелектриків

Пробій твердих діелектриків обумовлений поступовим або дискретним погіршенням його діелектричних властивостей, що призводить до незворотних змін у структурі матеріалу і остаточній втраті електричної міцності. Оскільки номенклатура твердих діелектриків різноманітна, вони суттєво відрізняються

структурою і властивостями, єдиного механізму пробою не існує, тому розрізняють *електричний, тепловий і іонізаційний* пробої.

При *електричному* пробої в діелектрику під дією короткотривалих імпульсів напруги відбувається руйнування кристалічної решітки і за рахунок автоелектронної емісії з катода утворюються лавини електронів. Час утворення потоку вільних електронів і руху їх від одного електрода до іншого залежить від матеріалу і товщини ізоляції і знаходиться в діапазоні одиниць-десятків мкс. Такий механізм розряду називається *лавинно-стрімерним*.

Процес розряду в *рівномірному* електричному полі починається з автоелектронної емісії. З катода виходять електрони, що прискорюються і прямують до анода. У зворотному напрямку розвивається позитивний стример. Швидкі електрони передають кінетичну енергію вузлам кристалічної решітки, збуджують її і можуть зруйнувати, утворивши термоіонізований (обвуглений) канал провідності. Канал наповнюється газоподібними продуктами, що збільшує число електронів, які беруть участь в іонізації молекул твердого діелектрика й розвитку розряду.

Зі збільшенням часу дії напруги на твердий діелектрик величина напруги пробою  $U_{np}$  зменшується (рис. 8.3).

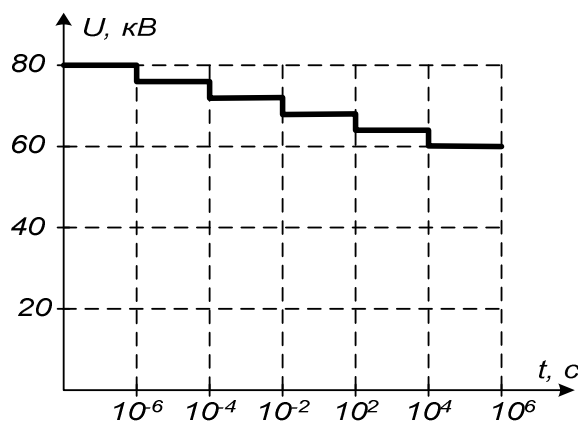


Рисунок 8.3 – Залежність електричної міцності ізоляції від тривалості дії напруги

Ця характеристика важлива з погляду визначення електричної міцності ізоляції і величини випробувальної напруги і називається *вольт-секундною* характеристикою ізоляції. Залежність напруги пробою  $U_{np}$  від товщини

ізоляції  $S$ :  $U_{np} = f(S)$  визначається видом полів між електродами: однорідними чи неоднорідними.

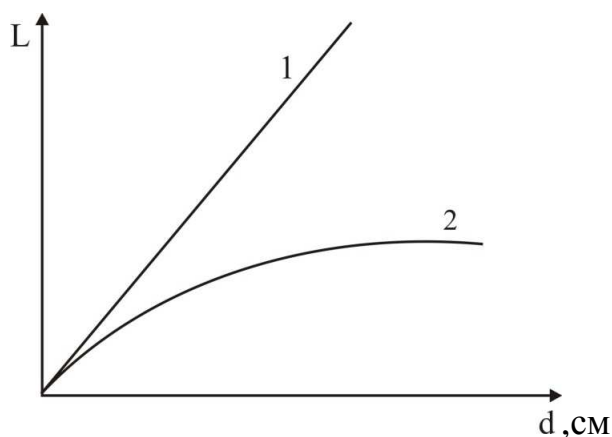


Рисунок 8.4 – Залежність напруги пробою  $U$  від товщини ізоляції  $d$ :  
(1) – в однорідному полі; (2) – в неоднорідному полі

При багаторазових впливах на твердий діелектрик імпульсів напруги відбувається поступове нагромадження в ньому дефектів, яке може призвести до пробою (рис. 8.5).

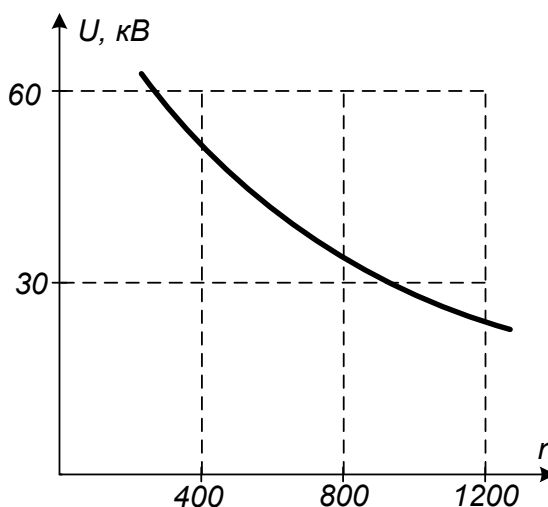


Рисунок 8.5 – Залежність напруги пробою від числа імпульсів  $n$ , що діють на ізоляцію

Відношення пробивної напруги при багаторазових впливах на ізоляцію до напруги пробою при одноразовій дії називається *коефіцієнтом кумулятивності* («cumulo» – накопичувати)

$$k_k = \frac{U_1}{U_n}; \quad 0,5 \leq k_k \leq 1. \quad (8.2)$$

*Тепловий пробій* обумовлений діелектричними втратами електричної енергії  $P_{акт}$  в діелектрику, який призводить до його нагрівання та викликає подальше зростання діелектричних втрат і провідності  $\sigma$ , що обумовлює ще більший розігрів і т.д. Якщо при цьому тепловиділення в діелектрику перевищує тепловідвід в навколишнє середовище, то відбувається термічне руйнування твердого діелектрика з утворенням термоіонізованих каналів, по яких розвивається тепловий пробій. Для однорідного діелектрика, розташованого між двома електродами пробивна напруга (за Фоком) дорівнює:

$$U_{np} = 3790 \cdot \sqrt{\frac{C_{\delta}}{f \cdot \varepsilon \cdot tg\delta_0 \cdot \alpha_p}} \cdot \varphi(\theta), \quad (8.3)$$

де  $U_{np}$  – діюче значення пробивної напруги, кВ;  $C_{\delta}$  – коефіцієнт теплопровідності діелектрика, Вт/см.град;  $f$  – частота, Гц;  $\alpha_p$  – температурний коефіцієнт зростання втрат;  $\theta$  – безрозмірний параметр, що характеризує тепловідведення з поверхні електродів.

*Іонізаційний пробій* твердого діелектрика обумовлений наявністю в реальних діелектричних матеріалах різноманітних неоднорідностей: структурних, газових, масляних, та різноманітних інородних включень, які під дією електричного поля іонізуються і різко знижують електричну міцність ізоляції. Будь-яка іонізація призводить до утворення вільних носіїв. Розвивається пробій, який називається іонізаційним. Послідовність його наступна. При тривалій інтенсивній іонізації відбувається розкладання органічної ізоляції, інтенсивне газовиділення, зростає  $tg\delta$  матеріалу і процес завершується електричним або тепловим пробоем.

Якщо в ізоляції створити напруженість  $E_n$  і через деякий час зняти, то іонізація в ній припиняється і ізоляція самовідновлюється. Якщо прикласти величину *критичної* напруженості іонізації  $E_{кр}$ , відбудеться руйнування структури твердого діелектрика й ізоляція не відновлюється. Величину початкової і критичної напруженості для кожного діелектрика встановлюють експериментально.



Контроль якості внутрішньої ізоляції визначають не за результатами виміру фактичних пробивних напруг, а шляхом перевірки здатності витримувати випробувальну напругу, з урахуванням можливих перенапруг. Тривалу електричну міцність ізоляції перевіряють побічно за результатами виміру величини  $tg\delta$ , інтенсивності часткових розрядів та ін. Вологорозрядну напругу визначають при нанесенні на поверхню ізоляторів мілкодисперсного пилу (цементу) з наступним зволоженням водою чи сконденсованою парою, або в атмосфері солоного туману.

#### 8.4 Ізоляція трансформаторів

Ізоляція силових трансформаторів складається з різноманітних за конструкцією елементів, що виконують різні функції. Повітряні проміжки між вводами – це зовнішня ізоляція, а всі ізоляційні проміжки всередині бака трансформатора – внутрішня, яка поділяється на *головну* й *поздовжню*. Головна ізоляція – це ізоляція обмоток щодо землі і між різними обмотками. Поздовжня ізоляція – це ізоляція між різними ділянками однієї і тієї ж обмотки (витками, шарами, котушками).

При заземленій нейтралі найбільша імпульсна напруга на головній ізоляції буде на відстані  $\frac{1}{3}$  довжини обмотки від початку і може приблизно на 20% перевищувати діючу напругу.

При ізольованій нейтралі найбільша імпульсна напруга буде на кінці обмотки і може перевищувати діючу напругу на 50÷80%.

Якщо з'являється імпульсна напруга з крутим фронтом, то на поздовжній ізоляції може виникнути напруга, яка більше ніж у 10 разів перевищує номінальну. Це буває при зрізах напруги, тобто пробої іскрового проміжку поблизу трансформатора. Через індуктивність проводів напруга на трансформаторі при цьому має коливальний характер (рис. 8.6). Перевищення імпульсу напруги може складати  $1,6 \cdot U_{зр}$  ( $U_{зр}$  – напруга зрізу).

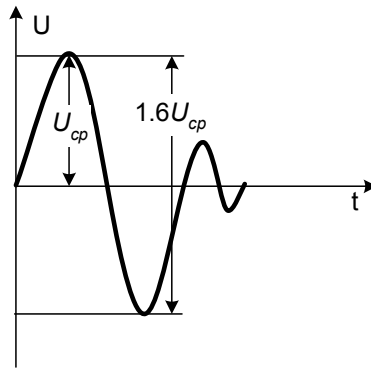


Рисунок 8.6 – Форма зрізаного імпульсу на трансформаторі

Для зниження напруги на поздовжній ізоляції застосовують ємнісні екрани і так звані переплетені обмотки, коли витки з'єднуються у певній послідовності. При цьому сусідні витки знаходяться під суттєво різними потенціалами і зниження імпульсних перенапруг досягається за рахунок збільшення робочої напруги на поздовжній ізоляції.

### 8.5 Конструкція ізоляції трансформаторів

У сучасних силових трансформаторах як головна використовується МБІ-ізоляція. Поздовжня ізоляція – це переважно ПМІ, або ізолювання за допомогою покриття витків і котушок обмотки лаком. МБІ-ізоляція має високу короткострокову електричну міцність і інтенсивно охолоджується циркуляцією масла. Для більшої ефективності бар'єри в МБІ-ізоляції повинні розташовуватися перпендикулярно до силових ліній електричного поля, тому в трансформаторах, де поле має складну конфігурацію, застосовують комбінацію бар'єрів різної форми, щоб виконати цю умову (рис. 8.7).

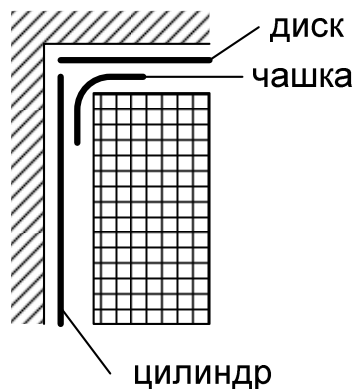


Рисунок 8.7 – Схема головної ізоляції трансформатора

Внутрішня і зовнішня ізоляція трансформаторів випробовується повним і зрізаним стандартними імпульсами і змінною напругою промислової частоти. Найбільш розповсюджений метод контролю поздовжній ізоляції – осцилографування струму в нейтралі трансформатора і порівняння отриманих осцилограм з типовими. Міжвиткові й міжкотушечні замикання змінюють характер осцилограм, дозволяючи знаходити характер і місце пробую.

У трансформаторах зі зниженим рівнем ізоляції нейтралі випробування здійснюють індуктованою напругою підвищеної частоти. На первинну обмотку трансформатора подають таку напругу, щоб на дослідній обмотці вона дорівнювала випробуваній. Нейтраль при цьому заземлюють. Підвищена частота застосовується тому, що подавана напруга приблизно дорівнює подвійній номінальній і при 50 Гц індукція в магнітопроводі і струм намагнічення досягли б неприпустимо високих величин.

Крім підвищеної напруги вимірюють також  $\operatorname{tg} \delta$  опір ізоляції, ємнісні характеристики обмотки, інтенсивність часткових розрядів.

Запитання для самоконтролю

1. Що таке внутрішня і зовнішня ізоляція?
2. Яка природа електропровідності твердої ізоляції?
3. Поясніть залежність міцності твердої ізоляції від температури.
4. Які розрізняють види й механізми пробую твердої ізоляції?
5. Як впливає неоднорідність поля на електричну міцність ізоляції?
6. Що таке «коефіцієнт кумулятивності», його вплив на ізоляцію
7. Сформулюйте теорію електричного і теплового пробую ізоляції?
8. Що таке «іонізаційний пробій» твердого діелектрика?
9. Які особливості має ізоляція силових трансформаторів?

## 9 ПОЛЯРИЗАЦІЯ ДІЕЛЕКТРИКІВ

### 9.1 Види поляризації діелектриків

Поляризація діелектриків полягає у зсуві центрів позитивних і негативних зарядів молекули або атома і перетворенні їх в диполь, орієнтований в напрямку зовнішнього електричного поля. Таким чином, тверді діелектрики набувають наведений електричний момент. Процес цей є оборотним. За формою взаємодії і виду зарядів поляризація діелектриків поділяється на *електронну, іонну і іонно-релаксаційну*.

*Електронна поляризація* діелектриків обумовлена зсувом орбіт електронів атома в напрямку до анода, а позитивно зарядженого ядра - до катода, внаслідок чого утворюється *диполь* – нейтрально заряджена частинка, у якої центри позитивного й негативного заряду рознесені і вона орієнтується в напрямку силових ліній зовнішнього електричного поля. Така поляризація розвивається за час  $\sim 10^{-15}$ с.

*Іонна поляризація* діелектриків обумовлена зсувом іонів у вузлах кристалічних решіток відносно положення рівноваги на малу відстань і має пружний (коливальний) характер.

*Іонно-релаксаційна* поляризація діелектриків полягає в утворенні об'ємних зарядів усередині діелектрика за рахунок переміщення слабо зв'язаних іонів у сусідні вузли, що призводить до утворення ділянок з підвищеною концентрацією іонів. Іонно-релаксаційна поляризація діелектриків спостерігається в діелектриках з домішками, у фарфорі, склі. Відмінність іонно-релаксаційної поляризації від іонної полягає в непружному характері переміщення іонів, тобто цей процес є незворотним.

Іонна й іонно-релаксаційна поляризація відбуваються значно повільніше, ніж електронна:  $(10^{-13} \div 10^{-10})$ с. Усі ці види поляризації мають назву *орієнтаційних*. Поляризація обумовлює утворення диполя і дипольного моменту в результаті зміщення зарядів  $g$  під дією поля:  $\bar{m} = g \cdot l$ . У результаті з'являється сумарний електричний (дипольний) момент. Вектор зсуву  $\bar{D}$ ,

напруженість електричного поля  $\bar{E}$  і поляризація  $\bar{P}$  пов'язані співвідношенням:

$$\bar{D} = \epsilon_0 \cdot \bar{E} + \bar{P} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \bar{E}, \quad (9.1)$$

де  $\epsilon_0$  – електрична постійна;  $\epsilon_r$  – відносна діелектрична проникність.

Для змінних електричних полів:  $E = E_m \cdot e^{j\omega t}$ . Вираз (9.1) діє тільки при низьких частотах, де період  $T = 2\pi/\omega$  перевищує час встановлення поляризації. У загальному випадку зв'язок між величинами  $D$  і  $E$  визначається формулою:  $D = \epsilon_0 \epsilon'_r \cdot E$ , де  $\epsilon'_r$  – комплексна відносна діелектрична проникність.

У твердих діелектриках через високу густину відбувається не поворот молекул, а дипольних груп атомів у структурі молекули без порушення внутрішньо молекулярних зв'язків із зовнішнім проявом властивостей біполярної поляризації. Це характерно для органічних діелектриків, до складу яких входить клітковина (гідроксильні групи ОН, смоли, полівінілхлориди та ін.). Усі ці види поляризації обумовлені зміщенням зв'язаних зарядів.

*Міграційна поляризація* обумовлена рухом у поле  $E$  вільних зарядів (іонів). Існує в неоднорідних діелектриках і спостерігається в ізоляції конструкцій високої напруги, де звичайно використовуються неоднорідні діелектричні матеріали або комбінації діелектриків.

Характерним прикладом міграційної поляризації є процеси в двошаровому діелектрику з параметрами:  $\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}, \gamma_1, \gamma_2$  і товщинами  $d_1$  і  $d_2$  (рис. 9.1).

## 9.2 Схема заміщення діелектрика

Параметри двошарової ізоляції визначаються такими параметрами:

– опором витoku шарів  $R_1 = \frac{1}{\gamma_1} \frac{d_1}{S}$ ,  $R_2 = \frac{1}{\gamma_2} \frac{d_2}{S}$ , ( $S$  – площа електродів;  $d_1$ ,

$d_2$  – товщини першого і другого шарів діелектрика);

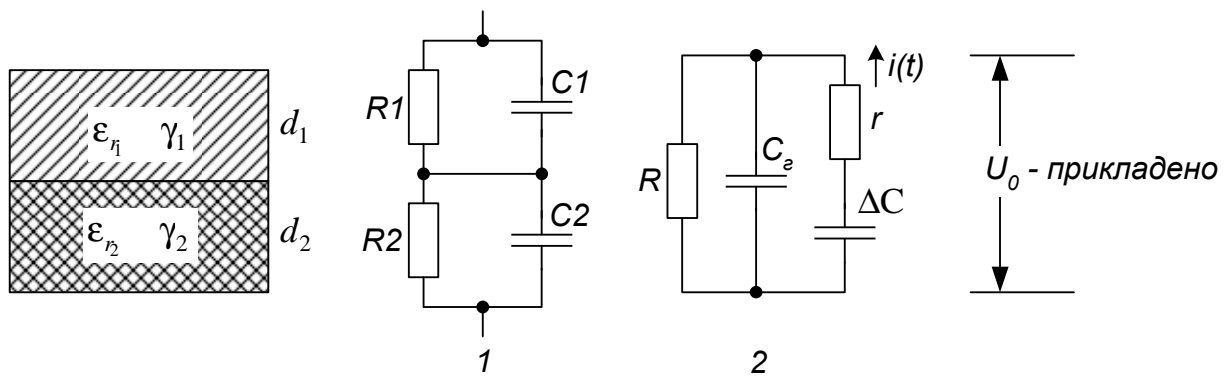


Рисунок 9.1 – Електрична схема заміщення двошарового діелектрика

$$- \text{ємністю шарів } C_1 = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot S_1}{d_1}, \quad C_2 = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot S_2}{d_2}, \quad S_1 = S_2. \quad (9.2)$$

Друга схема повинна бути еквівалентна першій у сталому режимі при підключенні до неоднорідної ізоляції джерела постійної напруги.

$R = R_1 + R_2$  – опір витoku, що характеризує провідність двошарового діелектрика в сталому режимі;

$$C_2 = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} - \text{геометрична ємність діелектрика.}$$

Параметри  $r$  і  $\Delta C$  визначають через параметри шарів

$$r = \frac{R_1 R_2 (R_1 + R_2) \cdot (C_1 + C_2)^2}{(R_1 C_1 - R_2 C_2)^2}; \quad \Delta C = \frac{(R_1 C_1 - R_2 C_2)^2}{(R_1 + R_2)^2 \cdot (C_1 + C_2)^2}. \quad (9.3)$$

Останні дві формули отримані з умови рівності повних опорів діелектрику в обох схемах заміщення. З другої схеми впливає залежність ємності неоднорідного діелектрика від частоти  $\omega$

$$C(\omega) = C_2 + \Delta C / (1 + \omega^2 T^2), \quad (9.4)$$

$$\text{де } T = r \cdot \Delta C = \frac{R_1 \cdot R_2 (C_1 + C_2)}{R_1 + R_2} - \text{постійна часу.}$$

Залежність  $C = f(\omega)$  графічно має вигляд на (рис. 9.2).

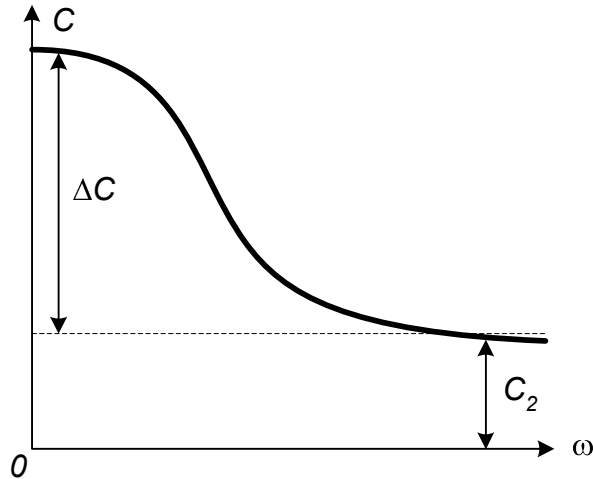


Рисунок 9.2 – Залежність ємності діелектрика від частоти

Звідки випливає, що ємність  $C_2$  неоднорідного діелектрика залежить від частоти, тобто справедливі співвідношення

$$R_1 C_1 \neq R_2 C_2, \text{ або } \frac{\epsilon_1}{\gamma_1} \neq \frac{\epsilon_2}{\gamma_2}. \quad (9.5)$$

Ці нерівності є умовою неоднорідності діелектрика, або умовою виникнення міграційної поляризації. При цьому на межі шарів накопичуються заряди *абсорбції* і на шарах встановлюється напруга:

$$U_1 = U_0 \frac{R_1}{R_1 + R_2}; \quad U_2 = U_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (9.6)$$

Відповідно, на ємностях шарів  $C_1, C_2$  накопичуються заряди

$$q_1 = U_1 \cdot C_1 = U_0 \frac{R_1 C_1}{R_1 + R_2}; \quad q_2 = U_2 \cdot C_2 = U_0 \frac{R_2 C_2}{R_1 + R_2}. \quad (9.7)$$

На межі розділу шарів сумарний заряд дорівнює

$$|q_{abc}| = |q_1 - q_2| = U_0 \frac{|R_1 C_1 - R_2 C_2|}{R_1 + R_2} = U_0 \sqrt{\Delta C (C_1 + C_2)} = U_0 \cdot \tilde{C}, \quad (9.8)$$

тут  $\tilde{C} = \sqrt{\Delta C (C_1 + C_2)}$  – середньоквадратична ємність діелектрика.

Отже, якщо  $R_1 C_1 \neq R_2 C_2$ , то на межі розділу шарів накопичується заряд абсорбції під дією якого починає протікати *струм абсорбції*. За інтенсивністю нагромадження заряду абсорбції оцінюють ступень неоднорідності ізоляції.

## Запитання для самоконтролю

1. У чому полягає явище поляризації діелектриків?
2. Назвіть види поляризації і їх особливості.
3. Який механізм орієнтаційної поляризації?
4. Яка природа й наслідки міграційної поляризації?
5. Наведіть схему заміщення двошарової ізоляції і поясніть її.
6. Як залежить ємність діелектрика від частоти напруги?
7. Що таке «геометрична ємність» діелектрика?
8. Яка природа струмів абсорбції

## 10 МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ВНУТРІШНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ

### 10.1 Використання абсорбційних струмів для контролю ізоляції

Внаслідок перегрівів, механічних навантажень, зволоження, перенапруг ізоляція поступово старіє – в ній виникають розподілені й зосереджені дефекти, мікротріщини. Виявляють дефекти за допомогою профілактичних випробувань, періодичність і норми яких регламентовані відповідними документами. Мета випробувань – своєчасна заміна дефектної ізоляції електроустаткування. Методи випробувань поділяються на дві групи: неруйнівні (це вимірювання опору  $R$ , ємності  $C$ ,  $\operatorname{tg}\delta$ , інтенсивності часткових розрядів) і руйнівні – вимірювання напруги пробною  $U_{np}$  ізоляції.

Неоднорідну ізоляцію можна уявити як складену з двох шарів різної питомої провідності  $\gamma$  і діелектричної проникності  $\epsilon$ . При включенні постійної напруги  $U =$  на межі шарів накопичується заряд абсорбції. Якщо ізоляція однорідна,

$$R_1 C_1 = R_2 C_2, \quad \text{або: } \frac{\epsilon_1}{\gamma_1} = \frac{\epsilon_2}{\gamma_2}, \quad (10.1)$$

то  $r \rightarrow \infty$ , і  $\Delta C = 0$ . Це означає, що заряд абсорбції не накопичується.



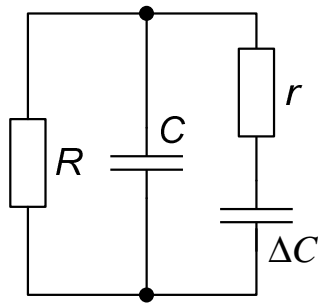


Рисунок 10.1 – Електрична схема заміщення ізоляції

Зі схеми заміщення (рис.10.1) випливає, що при підключенні неоднорідної ізоляції до джерела постійної напруги, струм повільно змінюється в часі

$$i = \frac{U}{R} + \frac{U}{r} e^{-\frac{t}{T}}. \quad (10.2)$$

Тут перша складова  $U/R$  – це сталий струм витоку, а другий член виразу (10.2), – це експоненційно загасаюча вільна складова струму, яка називається *струмом абсорбції* (без урахування короткочасного струму заряду геометричної ємності).

Опір ізоляції в перехідному режимі змінюється за законом

$$R(t) = \frac{U}{i(t)} = \frac{R}{1 + \frac{R}{r} e^{-\frac{t}{T}}}. \quad (10.3)$$

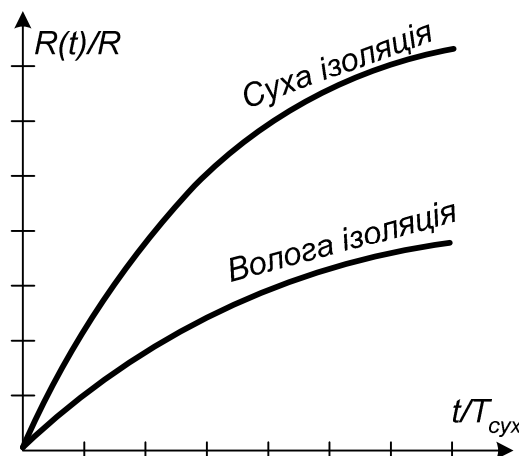


Рисунок 10.2 – Зміна опору ізоляції в часі

Отже величина опору ізоляції  $R$  і швидкість його зміни для вологої ізоляції менша, ніж для сухої (рис. 10.2). При випробуванні вимірюють

мегометром опір ізоляції  $R$  через 15с і 60с після включення напруги ( $R_{15}$ ,  $R_{60}$ ). Враховують абсолютне значення  $R_{60}$  і визначають коефіцієнт абсорбції:  $k_{abc} = R_{60} / R_{15}$ . Експериментально встановлено, що припустимим є зволоження ізоляції при  $k_{abc} > 1,3$ . При  $k_{abc} < 1,3$  ізоляція не придатна для експлуатації.

При змінній напрузі контроль ізоляції здійснюють шляхом виміру ємності при різних частотах напруги живлення.

Зі схеми заміщення ізоляції випливає, що еквівалентна ємність неоднорідного діелектрика залежить від частоти і постійної часу  $T$ . Оскільки  $T$  залежить від ступеня зволоження ізоляції, то ємність  $C_\omega$  із зростанням частоти змінюється тим більше, чим більша ступінь неоднорідності ізоляції (рис. 10.3).

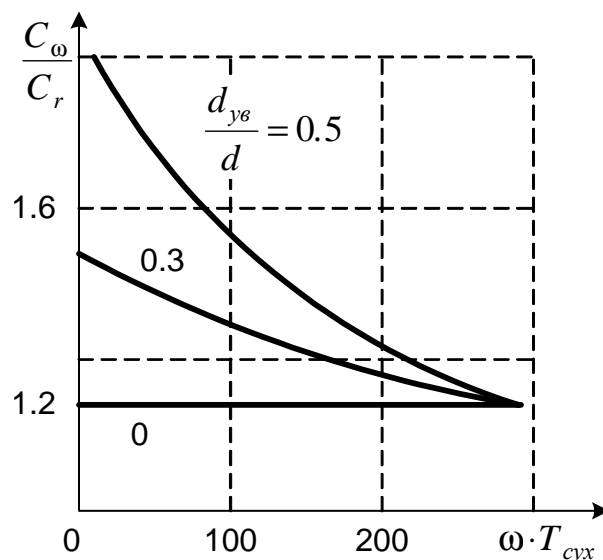


Рисунок 10.3 – Залежність ємності ізоляції  $C$  від частоти  $\omega$  при різній товщині  $d$  зволоженого шару

$$C(\omega) = C_r + \frac{\Delta C}{(1 + \omega^2 T^2)}, \quad C_r = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \quad (10.4)$$

Вимір ємності ізоляції здійснюють при двох частотах:  $\omega_1 = 2$  Гц і  $\omega_2 = 50$  Гц. Експериментально встановлено, якщо відношення  $C_2 / C_{50} > 1/3$ , то ізоляція є непридатною для подальшого використання.

## 10.2 Контроль ізоляції підвищеною напругою

Випробування підвищеною напругою дає змогу виявити багато дефектів в діелектриках, особливо зосереджених, що не встановлюються іншими методами, але можуть викликати і *пробій* неушкодженої ізоляції. Тому профілактичні й післяремонтні випробування підвищеною напругою здійснюють після контролю її спочатку неруйнівними методами, при цьому величина випробувальної напруги має бути на 10÷15% нижчою встановленої норми для *нового* електрообладнання. Ізоляція вважається такою, що витримала випробування, якщо не відбулося пробою, часткових пошкоджень, не спостерігається виділення диму, газу, звуку та інших ознак непридатності до експлуатації. Тривалість випробування – тричі по 1 хвилині.

Іноді застосовують прискорені випробування підвищеною частотою 100÷250 Гц. При цьому кількість часткових розрядів в ізоляції за секунду збільшується, діелектричні втрати зростають, швидко розвивається електричний або тепловий пробій, – тому час випробувань  $t$  зменшують:

$$t = 60 \cdot \frac{100}{T}, \text{ (але не менше 20 с.)} \quad (10.5)$$

Випробування постійною підвищеною напругою використовують для об'єктів великої ємності (кабелів, конденсаторів). У цьому випадку струм через ізоляцію малий (дорівнює  $I_{\text{вум}}$ ) і, відповідно, втрати потужності малі, тому тепловий пробій утруднений, і потрібна більш висока напруга для пробою дефектної ізоляції.

Види випробувальних напруг:

- підвищена напруга промислової частоти  $U_{\sim}$ ;
- підвищена спрямлена напруга  $U_{=}$ ;
- підвищена імпульсна напруга  $U_{\text{имп}}$ .

За *пробивну напругу* приймають амплітуду напруги, що викликає пробій у 50% випадків випробувань і називають її *п'ятдесяти відсотковою розрядною напругою* –  $U_{50\%}$ .

Для погодження умов роботи ізоляції й види випробувань застосовують такі стандартні методи випробувань:

- сухорозрядні;
- мокророзрядні;
- вологорозрядні.

Приведення мокро- і сухорозрядних випробувань до нормальних умов здійснюють за формулою

$$U_{p0} = U_{pi} \frac{k_{\gamma}}{k_p \cdot k_t}, \quad (10.6)$$

де  $U_{pi}$  – розрядна напруга при заданих умовах випробувань;  $U_{p0}$  – нормативні умови випробувань;  $k_{\gamma}$ ,  $k_p$ ,  $k_t$  – коефіцієнти, що враховують вологість, тиск і температуру.

### 10.3 Випробування і координація ізоляції за рівнем перенапруг

Випробування ізоляції комутаційними імпульсами напруги здійснюють електрообладнання класів напруги 330 і 500 кВ. Ізоляцію апаратів, ізоляторів, вимірювальних трансформаторів випробовують аперіодичними імпульсами 250/2500 мкс; внутрішню ізоляцію силових трансформаторів – коливальними імпульсами 100/1000 мкс. Випробувальна напруга комутаційних імпульсів для ізоляції відносно землі встановлена на 15% вища амплітудного значення верхньої межі пробивної напруги розрядника типу РВ. Випробувальна напруга комутаційних імпульсів для внутрішньої ізоляції між фазами силових трансформаторів прийнята в 1,5 рази вища, ніж щодо землі, а для зовнішньої міжфазної ізоляції – на 15% вища кратності внутрішніх перенапруг між фазами ( $3.5 U_{ф.найб.роб.}$ ).

Випробування короткочасною напругою 50 Гц, як і випробування напругою коливальних імпульсів, здійснюють для координації електричної міцності ізоляції електроенергетичного устаткування з величиною діючих

внутрішніх перенапруг. Величину випробувальних напруг  $U_{розр}$  визначають з урахуванням коефіцієнта кратності (табл. 10.1).

$$U_{розр.} = k_p \cdot U_{найб.роб.}, \quad (10.7)$$

де  $k_p$  – коефіцієнт кратності перенапруг.

Таблиця 10.1 – Кратність випробувальних напруг

$U_{ном},$ кВ	3-10	15-20	35	110-220	330	500	700	1150
$k_p$	4.5	4.0	3.5	3	2.7	2.5	2.1	1.8

Випробування внутрішньої ізоляції здійснюють підвищеною напругою протягом 1 хв. (у деяких випадках – 5 хв.).

Випробувальна напруга внутрішньої ізоляції  $U_{исн.}$  повинна враховувати коефіцієнт імпульсу  $k_{имп.}$  при впливі внутрішньої перенапруги, тобто підвищення електричної міцності ізоляції при короткочасних впливах, а також коефіцієнт  $k_{кум.}$ , що враховує кумулятивний ефект при старінні ізоляції.

$$U_{випр.} = \frac{U_{розр.ВН} \cdot k_{кум.}}{k_{имп.}}; \quad (10.8)$$

Коефіцієнт імпульсу приймають рівним:  $k_{имп.} = 1,1$ .

Коефіцієнт кумулятивності:  $k_{кум.} = 1.1 \div 1.15$ .

Випробування зовнішньої ізоляції проводять у сухому стані і під дощем:

$$U_{випр.д} = \frac{U_{розр.ВН}}{k_{имп.} \cdot k_{тис.}}. \quad (10.9)$$

Використовують також коефіцієнт, що враховує атмосферний тиск, який для висоти  $H < 1000$  м над рівнем моря:  $k_{тис.} = 0.94$ . Величина випробувальній напруги в сухих умовах експлуатації – це основна характеристика електрообладнання для закритих приміщень

$$U_{випр.с} = \frac{U_{розр.ВН}}{0.84}. \quad (10.10)$$

Підстанції, які працюють на кабельну мережу 3÷15 кВ, не підлягають впливу грозових перенапруг, а тільки комутаційних, тому для них використовується *полегшена* ізоляція, для якої нормується випробувальна напруга частотою 50 Гц.

Імпульсні перенапруги, що виникли в одній фазі, наводять у двох інших напругу того ж знака, що зменшує різницю потенціалів між фазами. Але знак робочої напруги  $U_p$  може бути протилежний знаку наведеної напруги. Для ізоляції електрообладнання 3÷220кВ визначальними є імпульсні випробувальні напруги, а для електрообладнання вищих класів напруги прийнято для міжфазної ізоляції  $U_{ном} = 3.5 \cdot U_{найб.роб.}$

#### 10.4 Випробувальні трансформатори і методика контролю

Особливістю конструкції випробувальних трансформаторів є їх мала потужність і нетривалий час роботи. Тому в них відсутні охолоджувальні елементи, а ізоляція має малий запас міцності:  $U_{випр.} = (1,1 \div 1,2) \cdot U_{ном.}$

Існують випробувальні трансформатори трьох типів:

- ТВО-140 – в ізольованому полімерному корпусі – для приміщень;
- ИОМ-100 – 25÷100 кВ·А; ИОМ-500 – 500 кВ·А; ИОМ–1200 – 1200 кВ·А

з одним вводом і металевим корпусом - для закритих і відкритих приміщень.

Найбільш досконалими є трансформатори з металевим баком і двома вводами, оскільки середня точка ВВ обмотки з'єднана з баком, отже вводи розраховані на напругу  $0,5 \cdot U_{ном}$  і мають незначні габарити та масу.

Для отримання високих випробувальних напруг використовують *каскадне* включення трансформаторів, при якому високовольтні обмотки трансформаторів на 750 кВ з'єднуються послідовно.

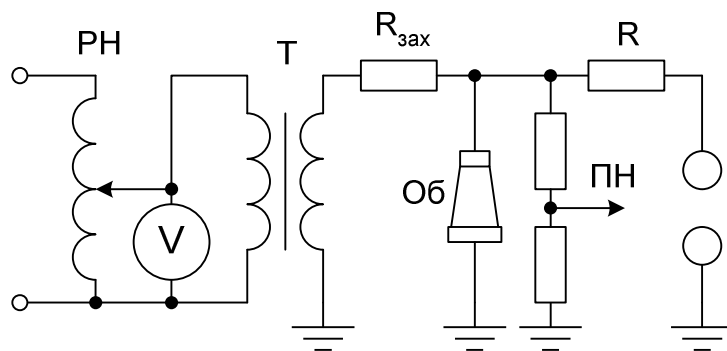


Рисунок 10.4 – Схема випробування ізоляції напругою 50 Гц

Тут  $R_{зах}$  – обмежує струм і зменшує крутість зрізу напруги на виході трансформатора, що необхідно для вирівнювання розподілу напруги уздовж обмотки при зрізі і, як наслідок, зменшує перенапругу на ізоляції.

При випробуванні внутрішньої ізоляції напругу тримають 1 хв., а для класів ізоляції 220 кВ і нижче – 5 хв. Випробування у сухому стані і під дощем здійснюють триразовим прикладанням напруги до випробувального об'єкту з повільним підйомом і витримкою 1 хв. Дощ має стандартні параметри: структура – краплинна; кут падіння –  $\angle 45^\circ$ ; сила: 3 мм/хв.; питомий опір води:  $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Деякі інші випробувальні напруги:

для електричних машин –  $U_{випр.} = (2,5 \div 2,5) \cdot U_{ном.}$

кабелі до 10 кВ –  $U_{випр.} = (5 \div 6) \cdot U_{ном.}$

кабелі 10-35 кВ –  $U_{випр.} = (4 \div 5) \cdot U_{ном.}$ ,  $t_{випр.} = 10 \div 15 \text{ хв.}$

У процесі випробувань струм витоку не повинен зростати!

## 10.5 Контроль ізоляції за інтенсивністю часткових розрядів

Часткові розряди (ЧР) – це розрядні процеси в ізоляції під дією прикладеної напруги, які виникають лише в окремих ділянках ізоляції: мікротріщинах, газових включеннях, локальних дефектах та ін. Найбільш небезпечні ЧР в газових включеннях, оскільки розрядна напруга в них набагато менша, ніж у твердої ізоляції і це сприяє розвитку пробую між-електродного проміжку. ЧР в газовому включенні виникають і зникають при змінній нарузі регулярно кожний напівперіод. При кожному розряді в його каналі розсіюється

електрична енергія  $W_{чр}$ , значна частка якої витрачається на руйнування ізоляції. Середня потужність регулярно виникаючих ЧР визначається за формулою

$$P_{чр} = n_f \cdot W_{чр}. \quad (10.11)$$

Звідки випливає, що із збільшенням напруги число ЧР і середня потужність зростають і, відповідно, зростає швидкість старіння ізоляції, а строк служби скорочується.

В основу цього метода контролю покладено зовнішню прояву ЧР – зниження при кожному ЧР напруги на ізоляції стрибком на величину  $\Delta U$ , яка пропорційна енергії  $W_{чр}$ . Стрибок напруги  $\Delta U$  пов'язаний з тим, що в каналі ЧР розсіюється частка енергії, що запасена в електричному полі ізоляції:

$$\Delta W_{чр} = C_x \cdot \frac{U^2}{2}, \quad (10.12)$$

тут  $C_x$  – ємність досліджуваної ізоляції;  $U$  – напруга на ізоляції в момент появи ЧР.

Враховуючи, що  $\Delta U_x \ll U$ , отримаємо:  $W_{чр} \approx \Delta U \cdot C_x \cdot U$ . Таким чином, стрибок напруги  $\Delta U_x$  на ізоляції пропорційний енергії часткового розряду. Існуючі вимірювальні установки для проведення такого контролю дозволяють фіксувати як інтенсивність (амплітуду), так і частоту виникнення ЧР, що свідчить про кількість і розміри дефектів в ізоляції, що дає змогу об'єктивно оцінити її стан.

## 10.6 Контроль ізоляції за тангенсом кута діелектричних втрат

Вимірювання тангенса кута діелектричних втрат ( $\text{tg}\delta$ ) є найбільш ефективним методом контролю якості ізоляції, оскільки її погіршення призводить до збільшення діелектричних втрат. Діелектричні втрати при дії на ізоляцію змінної напруги обумовлені струмами провідності й поляризації (зміщення). Оскільки струм зміщення містить активну складову, то процес поляризації супроводжується розсіюванням енергії в ізоляції. Активну складову щільності струму  $I_a$  можна записати:  $I_a = I_c \cdot \text{tg}\delta$ , де  $I_c$  – ємнісна складова



щільності струму зміщення через діелектрик,  $\delta$  – кут діелектричних втрат (рис. 10.5).

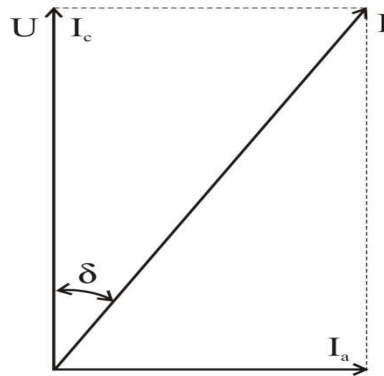


Рисунок 10.5 – Визначення кута діелектричних втрат ( $\text{tg } \delta$ )

При постійній напрузі через діелектрик тече струм провідності  $I_a$ , що викликає активні втрати

$$P_{\text{=}} = \frac{U^2}{R} = \frac{U^2}{\gamma \cdot S / d} . \quad (10.13)$$

Питомі активні втрати в одиниці об'єму

$$\rho_{\text{=}} = \frac{P_{\text{=}}}{dS} = \gamma \cdot E^2 . \quad (10.14)$$

При змінній напрузі в діелектрику протікають струми провідності  $I_a$  і зміщення  $I_c$  (в неоднорідному ще і абсорбції). Струм зміщення  $I_c$  має активну і ємнісну складові, на які накладаються активна і ємнісна складові струму провідності. Активну складову струму можна записати як  $I_a = I_c \cdot \text{tg } \delta$ ,  $\delta$  – кут діелектричних втрат. Активна складову струму провідності діелектрика  $I_a$  по відношенню до ємнісної складової  $I_c$  – незначна і нею можна знехтувати. Тоді питомі діелектричні втрати дорівнюють

$$p_{\text{diel}} = I_c \cdot E \cdot \text{tg } \delta, \quad (10.15)$$

а повна потужність діелектричних втрат в об'ємі діелектрика складає:

$$P_{\text{diel}} = I_c \cdot U \cdot \text{tg } \delta = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot \text{tg } \delta, \quad (10.16)$$

тут  $\omega$  – робоча частота;  $U$  – напруга прикладена до діелектрика;  $C$  – ємність діелектрика.

Таким чином, величина  $\text{tg } \delta$  є важливою характеристикою діелектрика, оскільки вона містить інформацію про процеси провідності й поляризації, які й

визначають його якість. Зокрема, якщо при знятті залежності  $tg\delta$  від рівня діючої напруги в інтервалі  $0,5 \div 1,5 U_{ном}$  його величина зростає, це свідчить про виникнення часткових розрядів в ізоляції. Вимірювання  $tg\delta$  здійснюється високовольтними мостами, включеними по нормальній (якщо обидва електроди об'єкта ізолювані) або «перевернутій» схемам (один електрод об'єкта заземлений). Міст складається з двох пліч, в одному з яких знаходяться змінні еталонні ємність  $C_e$  і резистор  $R_e$ , а в іншому – досліджуваний об'єкт з невідомими параметрами  $C_x$  і  $R_x$ . При досягненні рівності струмів в обох плечах мосту (що фіксується гальванометром, включеним в діагоналі моста), значення параметрів  $C_x$  і  $R_x$  дорівнюють відповідним еталонним величинам. Тоді можна записати:  $tg\delta = \omega \cdot C_x \cdot R_x = \omega \cdot C_e \cdot R_e$ . Оскільки при напрузі 50 Гц,  $\omega = 100\pi$ , то взявши  $R_e = 10000/\pi$ , отримаємо:  $tg\delta = C_e \cdot 10^6$ .

При проведенні вимірювань на діючому обладнанні для зменшення похибки здійснюють два виміри з поворотом фази на  $180^\circ$ .

#### Запитання для самоконтролю

1. Перелічіть руйнівні й неруйнівні методи контролю ізоляції.
2. Які особливості контролю ізоляції підвищеною напругою?
3. Які види випробувальних напруг використовують для контролю?
4. У чому полягає метод абсорбційних струмів контролю ізоляції?
5. У чому фізична сутність виникнення часткових розрядів?
6. Як реалізується контроль ізоляції методом часткових розрядів?
7. У чому полягає фізичний зміст параметра  $tg\delta$ ?
8. Як здійснюють контроль ізоляції методом виміру  $tg\delta$ ?
9. Який фізичний принцип методу контролю «опір-час»?
10. Який фізичний принцип методу контролю «ємність-частота»?

# 11 ВИСОКОВОЛЬТНІ ІЗОЛЯТОРИ

## 11.1 Класифікація ізоляторів

Ізолятори класифікують за чотирма основними ознаками:

- за напругою;
- за родом установки;
- за призначенням;
- за конструкцією.

1. За *напругою* ізолятори поділяються на високовольтні (ВВ) і низьковольтні (НВ); ВВ – на напругу більшу за 1000 В; НВ – на напругу меншу за 1000 В.

2. За *родом установки*: – для внутрішньої установки;  
– для зовнішньої установки.

3. За *призначенням*: апаратні й лінійні.

Апаратні призначені для кріплення струмоведучих частин електроустаткування, апаратів і машин (прохідні ізолятори на баках трансформаторів, ВВ вимикачів, конденсаторів);

Лінійні використовують для кріплення й ізоляції проводів ліній електропередач і електропроводів залізничних мереж.

4. За конструкцією *апаратні* поділяються на:

- опорні;
- прохідні;
- опорно-штирьові;
- стрижневі, опорно-стрижневі;
- у формі тяг, важелів, стрижнів.

*Лінійні* поділяються на: штирьові й підвісні.

Підвісні поділяються на тарілчасті й стрижневі.

Для кріплення шин закритого розподільного пристрою на 35 кВ використовують прості ізолятори із слабкорозвинutoю поверхнею, а для відкритого простору – опорно-штирьові зі складною поверхнею.

## 11.2 Вводи високовольтні маслонаповнені

Вводи виготовляють на: 110, 150, 220, 330, 500, 750 кВ змінного струму – від 200 до 4000А. Вводи мають таке призначення, виконання і маркування.

Апаратні:

- для трансформаторів і реакторів – Т;
- для масляних вимикачів – У;
- для виведення струмоведучих частин через стіни і перекриття – Л;
- для спец. реакторів – Р.

За умовами експлуатації:

- для районів з невеликим забрудненням;
- для районів з сильним забрудненням з посиленою ізоляцією – У;
- для тропіків – Т.

За конструктивним виконанням:

- герметичні – Г;
- негерметичні;
- мають загальну масляну систему з апаратом – О;
- мають провідник для підключення контрольних приладів – П.

Приклади маркування високовольтних вводів.

$\frac{\text{МБВУ}}{0-15} - 110/220 - \text{У1} \text{ГОСТ } 10693 - 75$

Масляні вимикачі  
Струм, А  
Кліматичне виконання  
Можливий кут нахилу  
Напруга, кВ  
Категорія розташування

$\frac{\text{ГМБТП}}{0-45} - 220/1000 - \text{У1}$

Гермет. тр-ра  
Для вимір.  
Ток, А  
Кліматичне виконання  
Можливий кут нахилу  
Напруга, кВ  
Категорія розміщення

Запитання для самоконтролю

1. За якими ознаками здійснюють класифікацію ізоляторів?
2. Які існують типи ізоляторів і принципи їх маркування.
3. Які високовольтні вводи використовують в електроенергетиці?
4. Принципи маркування високовольтних вводів.
5. Чим відрізняються ізолятори для зовнішньої установки від ізоляторів для закритих приміщень?

## 12 ВИДИ СТАРІННЯ ВНУТРІШНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ

### 12.1 Електричне старіння

При експлуатації на ізоляцію діють електричні, теплові, механічні та інші фактори. Вони призводять до складних процесів погіршення діелектричних властивостей, що називають старінням ізоляції. Процес старіння ізоляції обмежує термін служби, тому необхідно вживати заходи, що передбачають зниження темпів старіння і забезпечують необхідний термін її служби (25÷30 років).

Розрізняють *електричне, теплове і механічне* старіння ізоляції. Процес старіння відбувається також через абсорбцію вологи поверхнею діелектрика та забрудненням з навколишнього середовища. У процесі експлуатації усі види старіння відбуваються одночасно і складним чином впливають один на одного.

При робочій напрузі, а також при напрузі в 5÷20 разів меншій за розрядну, в ізоляції також відбуваються процеси старіння. Із збільшенням діючої напруги темпи старіння зростають, а строки служби відповідно зменшуються. Залежність терміну служби  $\tau$  від напруги  $U$  в широкому діапазоні  $\tau$  має складний характер. Але для малих  $\tau$  (від одиниць до 10000 годин) експериментальна залежність має вигляд

$$\bar{\tau} = A/U^n, \quad (12.1)$$

де  $A$  – постійна ізоляції;  $n$  – величина, залежна від конструкції ізолятора і роду діючої напруги (наприклад, для ПМІ:  $n = 4 \div 8$ , для МБІ:  $n = 50 \div 80$ ).

Для великих (більше  $10^4$  годин)  $\tau$  справедливий вираз

$$\bar{\tau} = \frac{A_1}{(U - U_{ч.р.})^{n1}}, \quad (12.2)$$

де  $U_{ч.р.}$  – напруга появи в ізоляції часткових розрядів, що є причиною її інтенсивного старіння.

Інтенсивність електричного старіння залежить також від ряду факторів, що не підлягають контролю. Це кількість, розмір і розташування мікронерівностей на поверхні електродів. Тому термін служби ізоляції при заданій нарузі є значною мірою випадковою величиною.

Для опису  $\tau$  як випадкової величини використовують функцію екстремального розподілу Вейбулла:

$$F(\tau) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\tau}{b} \right)^c \right], \quad (12.3)$$

де  $b$  – параметр масштабу, рівний терміну служби при імовірності відмови – 0,63;  $c$  – параметр форми, що залежить від стандарту розподілу.

Параметр  $b$  пропорційний середньому значенню (математичному очікуванню)  $\bar{\tau}$ :  $b = k_b \cdot \bar{\tau}$ ,  $k_b$  – коефіцієнт залежний від параметра  $c$  (при  $c = 10 \div 15$ ,  $k_b = 1,03 \div 1,05$ ).

Тоді

$$F(\tau) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\tau \cdot U^n}{A \cdot k_b} \right)^c \right]. \quad (12.4)$$

Цей вираз використовують для статистичного аналізу експериментальних даних про терміни служби  $\tau$  при оцінці припустимих для ізоляції робочих напруг.

Підвищення експлуатаційної надійності та строку служби ізоляторів досягається періодичним обмиванням та очищенням їх водою або

розчинниками і застосуванням гідрофобних покриттів – у вигляді твердих плівок чи в'язких паст типу вазелінів (кремнійорганічний вазелін КВ-3). Більш ефективні полімерні покриття ті, що мають властивості водовідштовхування і обволікають осілі тверді частинки бруду, запобігаючи утворенню провідних шарів в ізоляції. Використовують також герметизацію ізоляційних конструкцій.

Розповсюдженою причиною дострокового виходу з ладу є утворення тріщин у діелектрику під шапкою ізолятора. Ефективний метод контролю поточного стану ізолятора полягає у вимірі розподілу напруги по його елементах.

## 12.2 Старіння від механічних навантажень

При дії статичних і динамічних навантажень у твердих діелектриках відбувається впорядкований рух локальних дефектів, що поступово накопичуються і утворюють мікротріщини. При досягненні їх певної кількості і розмірів відбувається руйнування діелектрика. При дії статичного навантаження термін служби ізоляції  $\tau$  визначають за формулою

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp\left(\frac{W - \gamma \cdot \sigma}{k \cdot T}\right), \quad (12.5)$$

де  $\tau_0$ ,  $W$ ,  $\gamma$  – параметри, що характеризують міцносні властивості матеріалу ізоляції;  $\sigma$  – механічне напруження в матеріалі діелектрика від дії навантаження;  $k$  – постійна Больцмана;  $T$  – абсолютна температура.

При одночасному впливі механічних навантажень і сильних електричних полів старіння значно прискорюється через виникнення часткових розрядів у мікротріщинах, які підвищують темпи старіння ізоляції.

## 12.3 Вплив зволоження на процеси старіння

Волога просочується в ізоляцію з навколишнього середовища, а також в результаті термоокислювальних процесів. Це різко знижує опір струму витoku, тому що у волозі містяться розчинені й дисоційовані домішки, тобто вільні

іони. Внаслідок цього збільшуються діелектричні втрати і знижується напруга теплового пробою ізоляції. Оскільки вода є сильно полярним діелектриком, що має відносну діелектричну проникність  $\epsilon = 81$ , що набагато більше, ніж у діелектричних матеріалів, зволоження ізоляції може призвести до викривлення електричного поля і зниження напруги її пробою.

Незначна кількість води (10÷20 г) на 1т. масла значно знижує короточасну електричну міцність ізоляції. Для запобігання цьому використовують герметичні конструкції, захисні пристрої-осушувачі масла, гнучкі діафрагми. Здійснюють регламентний періодичний контроль ступеня зволоження ізоляції.

#### 12.4 Роль часткових розрядів у старінні ізоляції

У комбінованій ізоляції необхідно уникати появи часткових розрядів при найбільш допустимій робочій напрузі, забезпечивши умову

$$U_{\text{доп.р.}} < U_{\text{ч.р.}} \quad (12.6)$$

Тут величини напруги появи  $U_{\text{ч.р.}}$  має значний розкид який відповідає закону *нормального розподілу* (закону Гаусса). Тому  $U_{\text{доп.р.}}$  визначають з виразу

$$U_{\text{д.р.}} = \bar{U}_{\text{ч.р.}} - 3 \cdot \sigma_{\text{ч.р.}}, \quad (12.7)$$

де  $\bar{U}_{\text{ч.р.}}$  – середнє значення напруги появи часткових розрядів;  $\sigma_{\text{ч.р.}}$  – середньоквадратичне відхилення. Максимальна припустима напруженість в ізоляційному проміжку:

$$E_{\text{д.р.}} = \frac{U_{\text{д.р.}}}{d} \cdot k_n, \quad (12.8)$$

де  $d$  – товщина ізоляції;  $k_n$  – коефіцієнт форми ізолятора.

В ізоляційних конструкціях високої напруги найбільші  $U_{\text{д.р.}}$  в ПМІ ізоляції конденсаторів: 15÷18 МВ/м.; у ПМІ вводитів – 3÷4 МВ/м.



## 12.5 Теплове старіння ізоляції

У діелектричних матеріалах при  $T = 60\text{--}130^\circ\text{C}$  починаються хімічні реакції за участю електродів (мідь сприяє окисленню масла). У результаті змінюється структура матеріалу діелектрика і зменшується електрична міцність – це так зване теплове старіння ізоляції.

Для твердих діелектриків при підвищеній температурі відбувається поступове зниження механічної міцності, руйнування структури і пробій.

У рідких діелектриках при тепловому старінні утворюються газоподібні, рідкі й тверді продукти реакцій, що збільшують електропровідність, зростають діелектричні втрати внаслідок чого знижується електрична міцність ізоляції.

У комбінованій ізоляції під дією температури погіршуються як механічна міцність, так і електричні характеристики.

Інтенсивність теплового старіння обумовлена швидкістю  $V$  хімічних реакцій, що залежать від температури і визначаються рівнянням Арреніуса:

$$V = V_0 \cdot e^{-W_A/kT}, \quad (12.9)$$

тут  $W_A$  – енергія активації;  $k$  – постійна Больцмана;  $T$  – абсолютна температура. Вважають, що термін служби ізоляції  $\tau$  при тепловому старінні зворотно пропорційний швидкості хімічної реакції. Тоді відношення термінів служби при різних температурах  $T_1$  і  $T_2$ :

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = 2 - (T_1 - T_2)/\Delta T, \quad (12.10)$$

де  $\tau_1, \tau_2$  – терміни служби при  $T_1$  і  $T_2$ ;  $\Delta T$  – підвищення температури, що скорочує термін служби ізоляції в 2 рази. У середньому для різних видів ізоляції  $\Delta T \approx 10^\circ\text{C}$ .

Встановлені значення допустимої робочої температури ізоляції  $T_{д.р.}$  введенням класів нагрівостійкості (табл. 12.1).

Таблиця 12.1 – Класи нагрівостійкості ізоляції

Y	A	E	B	F	H	C
90°	105°	120°	130°	155°	170°	180°

Запитання для самоконтролю

1. Наведіть види старінні внутрішньої ізоляції
2. Поясніть механізм електричного старіння ізоляції.
3. Від чого залежить інтенсивність електричного старіння?
4. Поясніть механізм старіння від механічних навантажень.
5. Як впливає зволоження на інтенсивність старіння ізоляції?
6. Поясніть механізм теплового старіння ізоляції.
7. Назвіть класи нагрівостійкості ізоляції.
8. Які заходи запобігають інтенсивному старінню ізоляції ?

## 13 АПАРАТИ ЗАХИСТУ ВІД ПЕРЕНАПРУГ

### 13.1 Захисні проміжки (ПЗ)

ПЗ призначені для запобігання появі небезпечних для ізоляції електроустановок імпульсів перенапруги, не заважаючи їх роботі при номінальній напрузі. Найпростіший ПЗ – це іскровий проміжок ввімкнений паралельно ізоляційній конструкції (рис. 13.1).

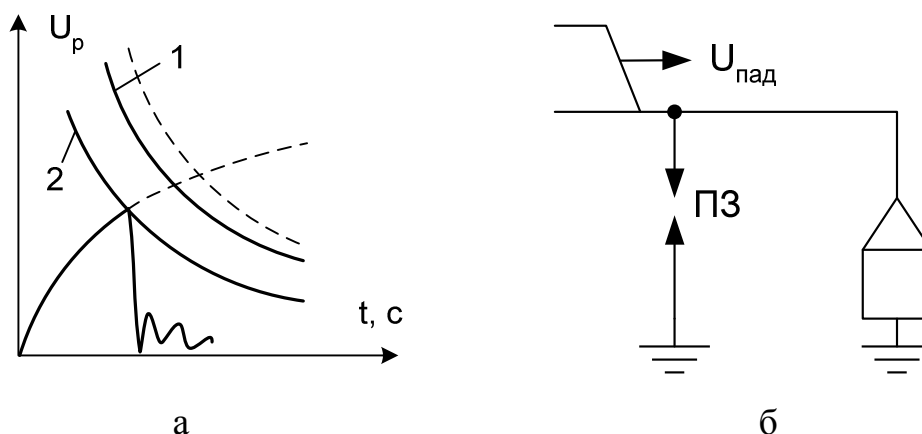


Рисунок 13.1

а – 1–ВСХ ізоляції; 2– ВСХ ПЗ; б – схема включення ПЗ

При набіганні імпульсу перенапруги в точку приєднання ПЗ відбувається пробій його між електродного проміжку з різким падінням напруги на лінії і ізоляція залишається непошкодженою. Після пробою ПЗ по його іонізованому проміжку протікає супровідний струм промислової частоти. Якщо електричний пристрій працює в мережі із заземленою нейтраллю або пробій ПЗ відбувся у 2-х чи 3-х фазах, то дуга супровідного струму переходить у КЗ. Тому необхідно гасити дугу супровідного струму, що є другою важливою функцією усіх захисних апаратів.

Захисні проміжки виготовляють із двох стрижневих електродів, закріплених у формі рогів, що створюють різко неоднорідне поле. Пробій ПЗ відбувається у нижній частині електродів, де відстань між ними мінімальна а напруженість – максимальна. Під дією електродинамічних сил та теплових потоків дуга з нижньої частини електродів піднімається по ним вгору, де розтягується і гасне, завдяки зменшенню напруженості  $E$  електричного поля в каналі розряду ( $E = U/L$ , де  $U$  – напруга запалення дуги;  $L$  – відстань між електродами).

ПЗ відрізняються простотою, дешевизною і широко застосовуються в мережах низької напруги. У мережах високої напруги ПЗ використовують для обмеження максимальних імпульсів перенапруги.

При виникненні дуги можливе аварійне відключення електроустановки, тому ПЗ ставлять у системи з пристроями автоматичного повторного включення (АПВ).

В установках до 35 кВ ПЗ мають невелику між електродну відстань, тому для запобігання випадковим замиканням у спусках, що заземлюють, послідовно ставлять додаткові іскрові проміжки.

Захисні апарати, що захищають електрообладнання від перенапруг і гасять дугу, називають *захисними розрядниками*. Існують трубчасті, вентильні, довгоіскрові захисні розрядники а також обмежувачі перенапруг нелінійні (ОПН).

### 13.2 Трубчасті розрядники (РТ)

Основа РТ – трубка 1 з газогенеруючого матеріалу (фібробакеліт, вініпласт). Один кінець її заглушений кришкою; 2 – внутрішній електрод; 3 – кільцевий електрод;  $l_1$  – дугогасний проміжок;  $l_2$  – іскровий проміжок (рис. 13.2).

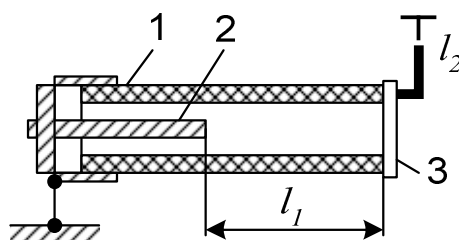


Рисунок 13.2 – Конструкція трубчастого розрядника

Трубка відокремлена від проводу фази зовнішнім іскровим проміжком  $l_2$ , щоб не розкладався матеріал діелектрика від емнісних і струмів витоку. Захисна дія РТ характеризується його ВСХ і опором заземлення. ВСХ визначає  $U_{проб}$  розрядника, а  $R_{зас}$  – імпульсну напругу, що залишається на ньому. Довжина зовнішнього іскрового проміжку регулюється залежно від умов захисту ізоляції, а довжина  $l_1$  – const для даної робочої напруги.

При набіганні імпульсу перенапруги обидва проміжки пробиваються, протікає струм робочої частоти, запалюється дуга, яка миттєво розігріває трубку, внаслідок чого виділяється газ. Миттєво зростає тиск, який видуває (вистрелює) іонізовані частинки газу із трубки і дуга гасне при першому проходженню струму через «0». Існує верхня межа струмів, перевищення якої може призвести до руйнування РТ.

РТ типу РТФ – це фібробакелітова трубка, РТ типу РТВ чи РТВУ – трубка з вініпласту. Останні мають більший (верхній) допустимий рівень робочого струму. Приклад маркування розрядників типу РТ.

$РТФ\ 110/08\ \div\ 5$   
 Напруга, кВ  
 кА (обмеження)

При розряді внутрішній канал розрядника поступово вигоряє, і якщо більше, ніж на 25%, розрядник треба замінити або пере маркувати на іншу напругу.

Недоліком такого апарата є те, що вихлоп іонізованих газів може призвести до міжфазного перекриття або перекриття на землю, якщо він спрямований на струмоведучі частини електрообладнання. Крута ВСХ і зона вихлопу не дозволяють використовувати РТ для захисту підстанційного обладнання. Тому основна сфера застосування – захист лінійних підходів до підстанцій, електроустаткування малопотужних підстанцій. Відтепер РТ майже не використовують, завдяки малому строку служби.

### 13.3 Вентильні розрядники

Для захисту електроустаткування підстанцій масово використовують вентильні розрядники РВ і нелінійні обмежувачі перенапруги ОПН.

Основним елементом вентильного розрядника є багаторазовий іскровий проміжок, з'єднаний послідовно з резистором, що має нелінійну ВАХ. Грозний імпульс пробиває іскровий проміжок і через РВ протікає струм, який створює падіння напруги на його резисторі. Завдяки нелінійній ВАХ напруга на резисторі змінюється мало при значній зміні імпульсу струму. Важливою характеристикою РВ є залишкова напруга  $U_{зал}$  на резисторі при визначеному імпульсному струмі (5÷14 кА), яка зветься *струмом координації*. Вона повинна бути, як і розрядна  $U_p$ , на 20÷25% нижче розрядної напруги ізоляції. Услід за імпульсним струмом через РВ йде супровідний струм промислової частоти уже при робочій напрузі  $U_{роб}$ . При цьому опір резистора різко зростає, струм РВ обмежується і при переході через «0» дуга гасне. Цьому сприяє також багатократний іскровий проміжок конструкція якого складається з великої кількості латунних дисків (наприклад, у РВ-35 кВ – їх 32 шт.), що дозволяє охолоджувати дугу, внаслідок чого виключається явище термоіонізації.

Найбільша напруга промислової частоти на РВ, при якій надійно обривається супровідний струм, називається *напругою гасіння*  $U_{гас}$ , а відповідний супровідний струм – *струмом гасіння*.

Гасіння супровідного струму може здійснюватися в умовах однофазного замикання на землю. Тому як за напругу гасіння  $U_{гас}$  приймають напругу на неушкоджених фазах при однофазному замиканні на землю:

$$U_{гас} = k_3 \cdot U_{ном}, \quad (13.1)$$

тут  $U_{ном}$  – номінальна лінійна напруга;  $k_3$  – коефіцієнт залежний від способу заземлення нейтралі: для пристроїв із заземленою нейтраллю  $k_3 = 0,8$ ; для ізольованої нейтралі  $k_3 = 1,1$ .

Дугогасна дія іскрового проміжку РВ характеризується *коефіцієнтом гасіння*:

$$k_{гас} = \frac{U_{пр\sim}}{U_{гас}}, \quad (13.2)$$

де  $U_{пр\sim}$  – пробивна напруга іскрових проміжків.

Захисна дія нелінійного резистора характеризується *коефіцієнтом захисту*  $k_{зах}$ , який визначається з співвідношення

$$k_{зах} = \frac{U_{ост}}{\sqrt{2} \cdot U_{гас}}. \quad (13.3)$$

Нелінійний резистор виготовлений з порошку електротехнічного карборунду SiC, частинки якого вкриті тонким непровідним шаром (~100 мкм) SiO<sub>2</sub>. При  $U_{роб}$  опір цього запорного шару  $R_{шару} = 10^6$  Ом·м. При напрузі  $U_{проб}$  опір стає  $10^{-2}$  Ом·м і струм імпульса прямує в землю. Властивість матеріалу різко змінювати свій опір залежно від величини напруги, забезпечуючи проходження дуже великих струмів при високих  $U$  і малих струмів при малих  $U$ , називається *вентильним ефектом*.

Пропускна спроможність розрядника характеризується максимальним значенням імпульсу струму тривалістю 20÷40 мкс і струмом прямокутної форми тривалістю 2 мс. Цей режим РВ повинен витримати не менш 20 разів.

Іскрові проміжки РВ (рис.13.4) розділені діелектричними (меканітовими) шайбами, де через різні діелектричні проникності  $\epsilon$  повітря і меканіта виникає іонізація. Пробій відбувається при коефіцієнті імпульсу  $\approx 1$ . Гасіння дуги засноване на нестабільному горінні короткої дуги в проміжку з холодними електродами, якими є латунні диски. Для збільшення струму гасіння використовують *магнітне гасіння дуги* постійним магнітним полем, за рахунок її обертання та інтенсивного охолодження. У цьому випадку струм гасіння зростає на порядок (проти 100 А в проміжках з нерухомою дугою).

Для надійного захисту ізоляції підстанцій ВСХ багаторазового іскрового проміжку повинна бути положистою. Схема заміщення багаторазового іскрового проміжку представляє ємнісний ланцюжок, подібно до схеми заміщення гірлянди. Імпульсна напруга по ланцюжку розподіляється дуже нерівномірно, забезпечуючи швидкий каскадний пробій одиничних проміжків. Це, разом з попередньою іонізацією, забезпечує низькі коефіцієнти імпульсу і положистий характер ВСХ вентильного розрядника (рис. 13.3).

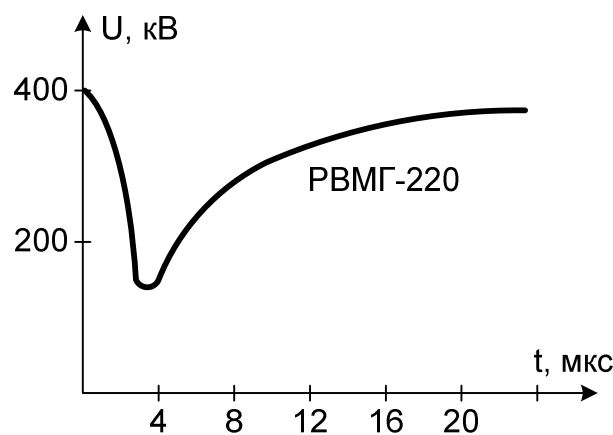


Рисунок 13.3 – Вольт-секундна характеристика РВМГ-220

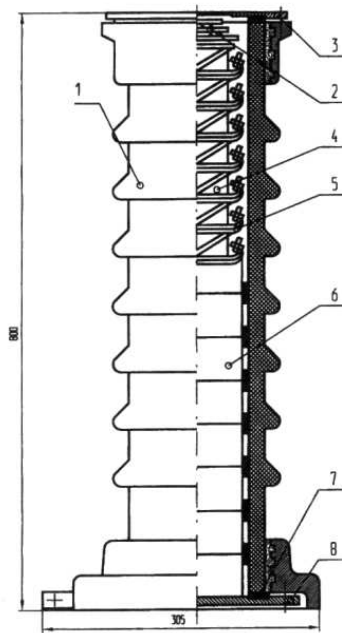


Рисунок 13.4 – Схема вентильного розрядника:

- 1 – армована фарфорова покришка; 2 – пружина; 3 – кришка;  
 3 – блок іскрового проміжку; 5 – шунтуючий резистор;  
 6 – робочий резистор; 7 – прокладка; 8 – диск

При крутих фронтах імпульсу нерівномірність розподілу напруги зменшує коефіцієнт імпульсу  $k_i < 1$ . Щоб утримати його близьким до 1, розрядники на напруги понад 1000 кВ комплектують ємнісними екрануючими кільцями, які вирівнюють розподіл напруги по іскровому проміжку.

Вентильні розрядники поділені на чотири групи. Найкращі захисні характеристики мають розрядники типу РВ-1, бо у них найменша величина залишкової напруги  $U_{\text{зал}}$ , тобто глибина обмеження імпульсів перенапруги найбільша.

IV група – РВП (підстанційний) і РВО (полегшений) застосовують для захисту сільських електричних мереж на напругу 3÷10 кВ.

III група – РВС (стаціонарний) – для захисту електроустаткування напругою 15÷220 кВ.

РВМ – (3÷35 кВ) магнітний на напругу 110÷500 кВ;

серія РВМГ (магнітний, грозовий) – відноситься до II групи.

ДО I групи відносяться розрядники РТВ – (струмообмежуючий) і РВРД (з дугою, що розтягується).



Комбіновані розрядники РВМК (рис. 13.5) призначені для обмеження як грозових, так і внутрішніх (комутаційних) перенапруг 330÷750 кВ. У них частина тервітового резистора зашунтована додатковим іскровим проміжком, який при внутрішніх перенапругах не пробивається (струм менше 1,5 кА), а при струмах більше 1,5 кА частина резистора шунтується проміжком і залишкова напруга знижується.

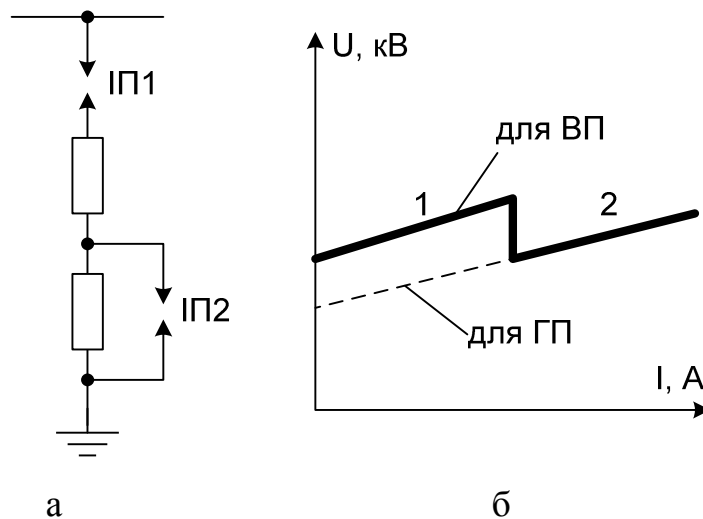


Рисунок 13.5 – Комбіновані розрядники РВМК  
а – Схема розрядника РВМК; б – вольт-амперна характеристика РВМК

### 13.4 Обмежувач перенапруг нелінійний (ОПН)

Недоліком РВ є мала нелінійність резистора, внаслідок чого на ньому падає значна залишкова напруга, яка прикладена до лінії. Тому імпульс перенапруги обмежується лише частково і продовжує рухатись по лінії, набігаючи на електроустаткування. На основі оксиду цинку (ZnO) розроблено більш ефективний тип захисних апаратів – ОПН, перевага яких полягає в глибокому обмеженні перенапруг, у тому числі міжфазних, за рахунок значно більшої нелінійності резистора, ніж у РВ. Апарат має малі габарити та велику пропускну здатність імпульсних струмів. ОПН комплектують у вигляді паралельно з'єднаних стовпчиків з дисків  $\varnothing 28$  і висотою 8 мм. Число стовпчиків варіюється від 4 (на 110 кВ) до 30 (на 750 кВ). Коефіцієнт нелінійності ОПН при комутаційних перенапругах дорівнює 0,03÷0,05, а при

грозових –  $0,07 \div 0,1$ . Висока нелінійність забезпечує проходження струмів від часток міліампера до декілька кілоампер, що дозволяє підключати його до мережі без іскрового проміжку. У ОПН немає поняття напруги гасіння, але тривалий вплив резонансних перенапруг, обумовлює проходження великих струмів і може призвести до порушення теплового балансу і руйнування апарату. Тому для ОПН обмежено час впливу підвищеною напругою від 0,15 с до 20 хв. ОПН дозволяє глибоко обмежувати і міжфазні перенапруги за допомогою схеми з іскровими проміжками (рис. 13.6).

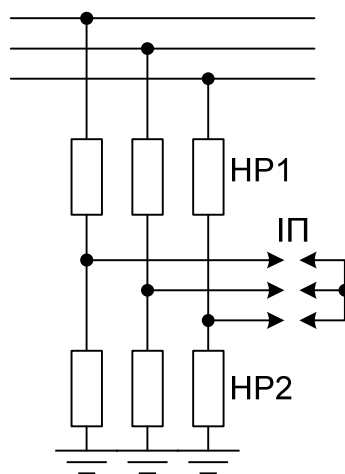


Рисунок 13.6 – Схема підключення ОПН з іскровими проміжками

В цьому випадку при комутаційних перенапругах, які завжди несиметричні, пробиваються іскрові проміжки ІП. Резистори HP2 з'єднуються паралельно, а резистори HP1 – попарно на міжфазні напруги. При відновленні нормального режиму струм в ІП зменшується до міліамперів і дуга в них гасне.

### 13.5 Довго-іскрові розрядники (РДІ)

При грозовому перекрытті ізоляції імовірність встановлення силової дуги  $P_d$  залежить в основному від середньої напруженості електричного поля в каналі перекрыття:

$$P_d = \left(1,59 \cdot \frac{U_{\phi}}{L} - 6\right) \cdot 10^{-2} = (1,59E - 6) \cdot 10^{-2}, \quad (13.4)$$

тут  $U_\phi$  – фазна напруга в лінії,  $L$  – довжина перекриття, м;  $E = U_\phi / L - 6$  – середня напруженість електричного поля на шляху перекриття. Тому за рахунок збільшення  $L$  можна знизити напруженість в розрядному проміжку і виключити тим самим імовірність виникнення силової дуги  $P_\phi$ , скоротивши число відключень лінії. Розрядний проміжок у РДІ в декілька разів довший, ніж довжина захищеної ізоляції, але має нижчу імпульсну електричну міцність, ніж міцність самої ізоляції. Це пояснюється особливостями ковзного розряду, який розвивається по поверхні ізоляційного проміжку і має нижчу розрядну напругу, чим такої ж величини повітряний проміжок. Внаслідок великої довжини  $L$  каналу імпульсного ковзного розряду, імовірність встановлення дуги короткого замикання дорівнює нулеві.

$$U_p = I^{0.2} \cdot \frac{d^{0.4}}{s^{0.2}} \cdot \epsilon^{0.4} \cdot a^{0.05}, \quad (13.5)$$

Згідно формули для визначення напруги ковзного розряду вона слабо залежить від відстані між електродами, тому великі проміжки  $L$  можуть бути перекриті ковзним розрядом при відносно малих напругах. Цей ефект ковзного розряду покладено в основу усіх конструкцій довго-іскрових розрядників.

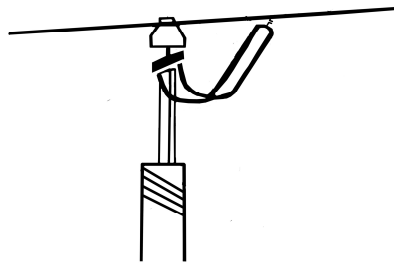


Рисунок 13.7 – Підключення РДІ-П до лінії

Розрядник типу РДІ-П (петлевий) виконано (рис. 13.7) з металевого стрижня покритого шаром поліетиленової ізоляції і зробленого у вигляді петлі, який за допомогою затискача кріпиться до заземленого електроду опори. В середній частині петлі надіта металева трубка, а між нею і проводом ЛЕП встановлено іскровий проміжок. Внаслідок великої ємності між металевою трубкою і стрижнем, вся напруга виявляється прикладена між проводом та трубкою. При пробі іскрового проміжку перенапруга прикладається між

трубкою та металевим стержнем, внаслідок чого з трубки вздовж поверхні ізоляції розвивається ковзний розряд до замикання його через вузол кріплення на заземлення. Завдяки великій довжині  $L$  каналу перекриття по поверхні петлі, середня напруженість електричного поля в каналі розряду від напруги промислової частоти складає  $\approx 7$  кВ/м. Зокрема, при товщині поліетиленової ізоляції 4 мм і довжині петлі 80 см при дії грозового імпульсу напруга пробою розрядника складає  $U_{50\%} = 100$  кВ, а ізоляції  $-U_{50\%} = 130$ кВ. При струмах  $I_{кз} < 300$  А силова дуга не виникає і лінія продовжує працювати без відключення. РДІ-П використовують для захисту ЛЕП 6÷10 кВ від індукованих грозових перенапруг, які найбільш поширені на таких лініях.

Різновидом такого розрядника є РДІ-М (модульний), який складається з двох відрізків кабелю з корделем, в якості якого використано напівпровідниковий матеріал.

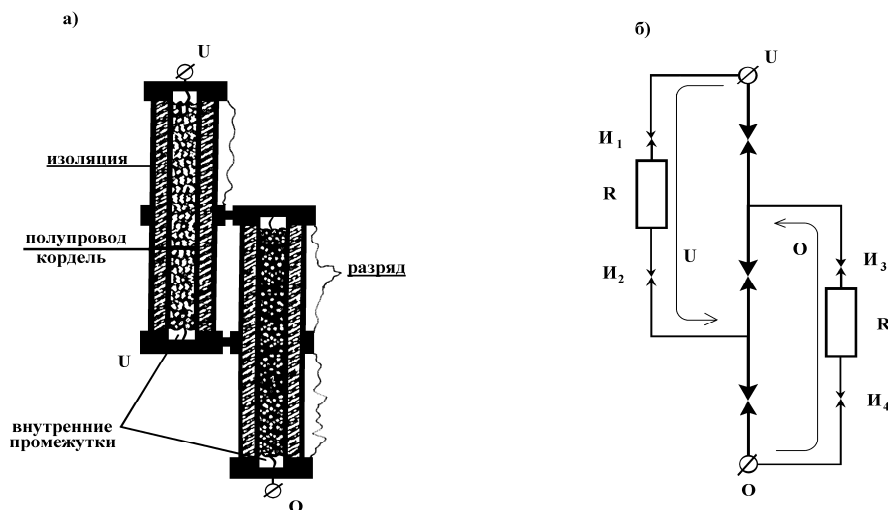


Рисунок 13.8 – Конструкція розрядника РДІ-М

Відрізки кабелю з'єднані таким чином, що утворюють три розрядних модулі (рис.13.8). Відрізки напівпровідникового корделю приєднані до металевих електродів через 4 внутрішні іскрові проміжки. При появі грозового імпульсу вони перекриваються і напівпровідниковий кордель верхнього відрізка кабелю, який має опір  $R$ , виносить високій потенціал  $U$  на поверхню нижнього відрізка кабелю в його середній частині. Аналогічно напівпровідниковій корделі нижнього відрізка кабелю виносить низькій потенціал «0» на поверхню верхнього відрізка кабелю в його середній частині.

Тому до кожного розрядного модуля одночасно прикладена повна напруга  $U$ , і для усіх 3-х розрядних модулів створюються умови для одночасного розвитку ковзних розрядів, які утворюють єдиний довгий канал перекриття. Вольт-секундна характеристика РДІ-М розташована значно нижче, ніж у РДІ-П, тому ефективність захисту розрядника модульного типу вища, ніж петлевого.

Розрядник типу РДІ-ІТ (ізоляційна трубка) виконано у вигляді ізоляційної трубки, що розташована на проводі лінії і утворює довгий проміжок для каналу ковзного розряду по її поверхні (рис. 13.9).

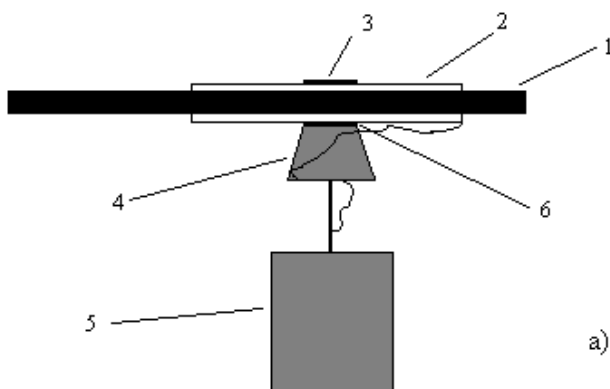


Рисунок 13.9 – Розрядник РДІ-ІТ

Встановлення таких розрядників на проводах ВЛ підвищує основну ізоляцію лінії і підвищує надійність її роботи. РДІ-ІТ захищає ВЛ як від індукованих, так і прямих ударів блискавки в провід.

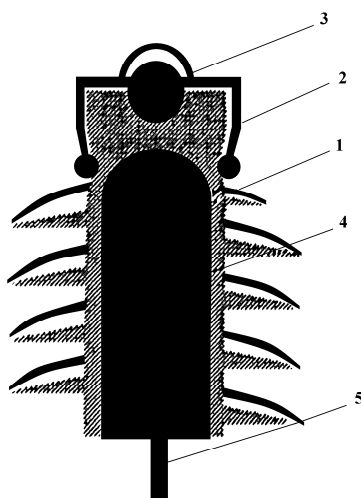


Рисунок 13.10 – Схема ізолятора-розрядника:

1 – внутрішній електрод; 2 – кріплення; 3 – провід; 4 – корпус;  
5 – заземлений електрод

ІРДІ (ізолятор-розрядник, рис. 13.10) забезпечує довгий шлях проходження імпульсного перекриття по спіральному шляху навколо ізолятора зі спіральними ребрами завдяки наявності направляючого електрода, який створює високу напруженість електричного поля на початку каналу розряду, що сприяє розвитку ковзного розряду. При цьому градієнт потенціалу в каналі перекриття дуже малий, що запобігає виникненню силової дуги.

Запитання для самоконтролю

1. Які функції виконують апарати захисту від перенапруг?
2. Сформулюйте принцип дії захисних проміжків.
3. Опишіть конструкцію та принцип дії трубчастих розрядників.
4. Опишіть конструкцію та принцип дії вентильних розрядників.
5. Що таке «струм координації» та «струм гасіння»?
6. Який зміст має параметр «коефіцієнт захисту»?
7. Наведіть класифікацію вентильних розрядників.
8. Сформулюйте принцип дії нелінійних обмежувачів.
9. Принцип дії та конструкції довгоіскрових розрядників (РДІ).
10. Типи, характеристики й сфера застосування РДІ.

## 14 ХВИЛЬОВІ ПРОЦЕСИ В ЛЕП

### 14.1 Рівняння хвильового процесу

Хвильовий процес в лінії виникає при будь-якому електромагнітному збудженні: ввімкненні або відключенні лінії, КЗ, ураженні розрядом блискавки.

Диференційні рівняння хвильового процесу в ЛЕП мають вигляд

$$-\frac{du}{dx} = L_0 \frac{di}{dt}; \quad -\frac{di}{dt} = C_0 \frac{du}{dt}, \quad (14.1)$$

де  $L_0$ ,  $C_0$  – індуктивність і ємність одиниці довжини ЛЕП.

Рішенням їх є хвильові функції, або хвилі напруги й струми:

$$\left. \begin{aligned} u &= u^+ + u^- = F^+(x - V \cdot t) + F^-(x + V \cdot t) \\ i &= i^+ + i^- = \frac{1}{Z} F^+(x - V \cdot t) - \frac{1}{Z} F^-(x + V \cdot t) \end{aligned} \right\} \quad (14.2)$$

Тут  $Z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$  – хвильовий опір лінії;

$V = \left( \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \right)$  – швидкість розповсюдження електромагнітної хвилі;

$C$  – швидкість світла – 300 м/мкс (для ЛЕП  $V \approx C$ );

$U^+ = F^+(x - Vt)$  – пряма набігаюча хвиля напруги;

$U^- = F^-(x + Vt)$  – зворотна хвиля напруги.

Звідси струм і напруга прямих та зворотних хвиль співвідносяться:

$$i^+ = \frac{U^+}{Z}; \quad i^- = \frac{U^-}{Z}. \quad (14.3)$$

Хвильовий опір однопровідної ЛЕП

$$Z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = 60 \ln \frac{2h}{r} = 138 \ln \frac{2h}{r}, \quad (14.4)$$

тут  $h$  – висота підвісу проводу;  $r$  – радіус проводу.

Індуктивність і ємність ЛЕП довжиною  $l$ :

$$L = L_0 \cdot l = \frac{Z}{V} \cdot l, \quad C = C_0 l = \frac{1}{ZV} \cdot l. \quad (14.5)$$

$Z$  у ЛЕП з однопровідними проводами фаз = 450 – 550 Ом,

$Z$  у ЛЕП з розщепленими проводами фаз = 350 – 400 Ом.

## 14.2 Заломлення і відбиття електромагнітних хвиль

Навантаження лінії складається з комбінації  $R, L, C$ .

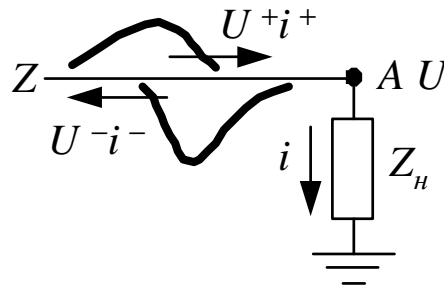


Рисунок 14.1– Схема хвильового процесу

$U^+, i^+$  – падаюча (набігаюча) хвиля напруги та струму;

$U^-, i^-$  – відбита хвиля напруги та струму;

$U, i$  (в точці «А») – заломлені хвилі напруги та струму.

Визначимо напругу і струм заломленої хвилі, переписавши диференційні рівняння таким чином:

$$U = U^+ + U^-$$

$$iZ = U^+ - U^- \quad \text{і складемо їх.}$$

Тоді:  $U + iZ = 2U^+$  – це рівняння справедливе в будь-якій ділянці ЛЕП в тому числі в точці «А», де  $U$  – це напруга в навантаженні.

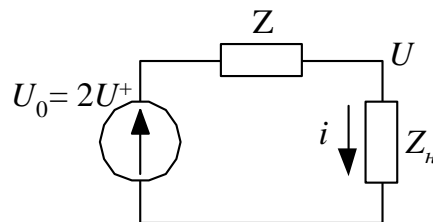


Рисунок 14.2 – Схема заміщення хвильового процесу в ЛЕП

Відбита хвиля:  $U^- = U - U^+$ . Зв'язок набігаючої хвилі  $U^+$  з заломленою  $U$  і відбитою  $U^-$  можна записати через коефіцієнти заломлення  $\alpha$  та відбиття  $\beta$ :

$$U = \alpha \cdot U^+; \quad U^- = \beta \cdot U^+, \quad (14.6)$$

де  $\alpha = \frac{2Z_n}{Z + Z_n}$  – коефіцієнт заломлення;



$$\beta = \frac{Z_n - Z}{Z_n + Z} - \text{коефіцієнт відбиття.} \quad (14.7)$$

Якщо лінія *розімкнена* ( $Z_n = \infty$ ,  $\alpha = 2$ ,  $\beta = 1$ ), то хвиля напруги відбивається із збереженням знаку, а хвиля струму – із зміною знака. Таким чином *напруга подвоюється*, а струм стає рівним нулеві.

Якщо лінія *замкнена* ( $Z_n = 0$ ,  $\alpha = 0$ ,  $\beta = -1$ ), – то хвиля напруги відбивається із зворотним знаком, а хвиля струму – із збереженням знаку. Таким чином, *напруга дорівнює нулеві*, а *струм подвоюється*.

### 14.3 Імпульсна корона на проводах ЛЕП

Заряд  $q$  на провід ЛЕП при  $U_{пер} > U_n$  дорівнює:

$$q = C_0 \cdot U_{пер} (1 + B \cdot U_{пер}), \quad (14.8)$$

де  $B$  – коефіцієнт, що характеризує ступінь деформації і затухання хвилі і залежить від діаметра проводу. Диференціальні рівняння хвильового процесу на лінії при імпульсній короні мають вигляд

$$-\frac{\partial U}{\partial x} = L_0 \frac{\partial i}{\partial t}, \quad -\frac{\partial i}{\partial x} = \frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial U} \cdot \frac{\partial U}{\partial t}. \quad (14.9)$$

Тут  $\frac{\partial q}{\partial U}$  – динамічна ємність проводу -  $C_\kappa(U)$ .

Із (14.8) випливає

$$C_\kappa(U) = C_0 \cdot (1 + 2BU). \quad (14.10)$$

Тоді диференційні рівняння (14.9) приймають вигляд

$$-\frac{\partial U}{\partial x} = L_0 \frac{\partial i}{\partial t}; \quad -\frac{\partial i}{\partial x} = C_\kappa \frac{\partial U}{\partial t}. \quad (14.11)$$

Рішенням цих рівнянь є хвильова функція  $U = F(x - V_\kappa t)$ .

Тут  $V_\kappa$  – швидкість розповсюдження хвилі з короною, яка *залежить від напруги* (рис. 14.1):

$$V_\kappa = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0(U)}} \quad (14.12)$$

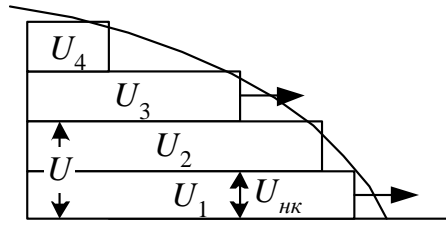


Рисунок 14.1 – Залежність швидкості імпульсної корони  $V_k$  від напруги  $U$  імпульсу

Для повітряної ЛЕП  $V_k = \frac{C}{\sqrt{1+2BU}}$ , ( $C$  – швидкість світла).

Звідки деформація фронту хвилі на відстані  $l$ :

$$\Delta t(U) = \frac{l}{v_r} - \frac{l}{c} = \frac{l}{c} \cdot [\sqrt{1+2BU} - 1] \approx \frac{l}{c} \cdot B \cdot U, \quad (14.13)$$

оскільки  $2B \cdot U \ll 1$ .

Подовження фронту імпульсу на 1 км лінії за рахунок імпульсної корони

$$\Delta \tau_\phi = \left(0,5 + \frac{0,008 \cdot U_{\max}}{h}\right) \cdot \frac{1}{k}, \quad (14.14)$$

де коефіцієнт  $k = 1; 1,1; 1,4$  – для 2-х, 3-х, 4-х проводів у фазі, відповідно.

Імпульс перенапруги розповсюджується по лінії, деформуючись і згасаючи за рахунок імпульсної корони та опору заземлення. Фронт імпульсу подовжується, а амплітуда знижується за рахунок активних втрат струму корони в землю згідно виразу

$U = U_{\max} \cdot e^{-a\sqrt{x}}$ , тут  $x$  – відстань до точки удару блискавки,  $a$  – коефіцієнт  $= 0,07 \text{ км}^{-0,5}$  для ЛЕП  $\geq 110 \text{ кВ}$ .

Запитання для самоконтролю

1. Напишіть рівняння хвильового процесу в лінії.
2. Чому дорівнює хвильовий опір лінії?
3. Накресліть схему заміщення хвильового процесу.
4. Що таке коефіцієнт відбиття та переломлення?
5. Чому дорівнюють коефіцієнти  $\alpha$  і  $\beta$  при розімкненій лінії?
6. Чому дорівнюють коефіцієнти  $\alpha$  і  $\beta$  при закороченій лінії?
5. Як впливає імпульсний коефіцієнт на хвилю перенапруги?
6. Чому дорівнює подовження фронту імпульсу перенапруги?
7. Як залежить швидкість імпульсної корони від напруги?

## 15 БЛИСКАВКОЗАХИСТ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ

### 15.1 Інтенсивність грозової діяльності

Повітряні ЛЕП щорічно десятки разів на кожні 100 км лінії уражаються блискавкою, викликаючи проходження великих струмів і появу високих імпульсних перенапруг. Тому на металевих опорах використовують 1÷2 заземлених троси, розташованих вище фазних проводів. Але трос не виключає можливості появи високих потенціалів на опорі при ударі блискавки, що може причинити розряд з опори на провід.

Імовірність перекриття  $P_{пер}$  ізоляції ЛЕП оцінюють виходячи з параметрів лінії, імпульсної електричної міцності гірлянд ізоляторів і імовірності величини струмів блискавки. Число можливих перекриттів визначають таким чином

$$n_{пер} = n_{уд} \cdot P_{пер} . \quad (15.1)$$

По шляху перекриття ізоляції протікає струм робочої частоти (струм КЗ). Якщо дуга КЗ горить стійко, то лінія відключається і потрібний АПВ. При інженерних розрахунках оцінюють імовірність переходу імпульсного перекриття в стійку дугу за середньою напруженістю електричного поля  $E_{ср}$  уздовж шляху перекриття  $l_{пер}$  при найбільшій робочій напрузі

$$E_{ср} = \frac{U_{найб.роб.}}{l_{пер}} , \text{ кВ/м} \quad (15.2)$$

Для ліній на дерев'яних опорах і довгих повітряних проміжках імовірність виникнення стійкої дуги  $P_{\delta}$  дорівнює

$$P_{\delta} = (1.6 \cdot E_{ср} - 6) \cdot 10^{-2} . \quad (15.3)$$

Для ліній на металевих опорах при номінальній напрузі до 220 кВ приймають  $P_{\delta} = 0.7$ ; при напругах 330 кВ і вище –  $P_{\delta} = 1.0$ .

Число відключень на 100 км ЛЕП в районі зі 100 грозовими годинами на рік:

$$n_{відкл} = 4h_{ср} P_{пер} P_{\delta} , \quad (15.4)$$

де  $h_{ср}$  – середня висота підвісу троса або проводу.

На ЛЕП 6÷35 кВ з ізолюваною нейтраллю і металевими або залізобетонними опорами троси не використовують, оскільки при будь-якому струмові блискавки відбувається зворотне перекриття з троса на провід. Тому застосовують АПВ і встановлюють дугогасні *реактори* струму однофазного замикання на землю. Отже існують два методи зменшення числа грозових відключень лінії:

- зменшення імовірності перекриття  $P_{пер}$ ;
- зменшення імовірності переходу перекриття в стійку дугу КЗ –  $P_0$ .

*Перший метод* реалізується підвіскою тросових блискавковідводів і створенням малого імпульсного опору заземлення.

*Другий метод* реалізується подовженням шляху перекриття, що призводить до зниження в ньому середньої напруженості поля, або використанням дугогасних реакторів у мережах 6÷35 кВ, які значно збільшують імовірність загасання дуги. З умов надійності електропостачання припустиме число відключень ЛЕП у рік приймають рівним:

$$n_{відкл.доп} = \frac{N_{доп}}{(1 - \beta_{АПВ})}, \quad (15.5)$$

де  $N_{доп}$  – допустиме число перерв електропостачання на рік.  $N_{доп} \leq 0,1$  – без резервування;  $N_{доп} \leq 1$  – з резервуванням;  $\beta_{АПВ}$  – коефіцієнт успішності АПВ, який дорівнює 0,8÷0,9 для ЛЕП 110 кВ та більше на металевих та залізобетонних опорах.

Останнім часом дуже ефективними для даного класу робочих напруг виявилось застосування захисних апаратів типу РДІ, які повністю виключають можливість виникнення силової дуги в ЛЕП і зворотного перекриття ізоляції.

## 15.2 Грозостійкість ЛЕП без тросів

Удар блискавки в провід супроводжується розтіканням струму  $I_0$  в обидва боки, і амплітуда хвилі перенапруги дорівнює

$$U = I_m Z_{np} / 2, \quad (15.6)$$

де  $Z_{np}$  – хвильовий опір проводу  $\approx 300$  Ом (з урахуванням імпульсної корони). При коронуванні ємність проводу зростає і тому знижується  $Z_{np}$ . На ЛЕП з металевими опорами імпульс перенапруги  $U$  при струмі блискавки  $5\div 10$  кА (300÷3000 кВ) призводить до перекриття гірлянди. Імпульс перенапруги на ураженому проводі індуктує напругу на сусідньому проводі і між ними виникає різниця потенціалів  $U_{pn}$ :

$$U_{pn} = \frac{I_n Z_{np}}{2} (1 - k), \quad (15.7)$$

де  $k$  – коефіцієнт електромагнітного зв'язку між проводами ЛЕП який з врахуванням імпульсної корони дорівнює  $0,25\div 0,4$ .

Ймовірність перекриття лінійної ізоляції  $P_{nep}$  розраховують за критичним значенням струму блискавки  $I_{кр}$ , який визначається з умови рівності діючої напруги  $U$ , і імпульсної  $U_{50\%}$  розрядної напруги ізоляції згідно формули

$$I_{кр} = \frac{2U_{50\%}}{Z} \quad \text{– для металевих і залізобетонних опор.}$$

Тут розрядний проміжок – гірлянда, тому існує ймовірність виникнення дуги  $P_0$  і велика ймовірність перекриття ізоляції  $P_{nep}$ . Отже, ЛЕП- 110 кВ і вище захищають тросовими блискавковідводами по усій довжині. Критичне значення струму для дерев'яних опор

$$I_{кр} = \frac{2U_{50\%}}{Z(1-k)}. \quad (15.8)$$

Тут низьке число відключень лінії без тросів пов'язане з малою ймовірністю переходу імпульсного перекриття в стійку дугу завдяки довжині дерев'яній траверсі, яка збільшує електричну міцність ізоляції.

ЛЕП-35 кВ на металевих опорах (з ізолюваною нейтраллю) при наявності ДГК мають  $P_0 \approx 0$ . Тому грозові відключення таких ЛЕП звичайно відбуваються тільки при дво- або трифазних перекриттях. Тут доцільно застосовувати додаткові штучні заземлювачі для зменшення опорного заземлення опор  $R_i$ .

Якщо розряд блискавки влучає в провід на невеликій відстані від опори, то через заземлювач протікає повний струм блискавки й опора виявляється під високим потенціалом

$$U = I_{\sigma} \cdot R_i \quad (15.9)$$

На сусідньому проводі наводиться потенціал

$$U = k \cdot I_{\sigma} \cdot R_i \quad (15.10)$$

і перекриття його ізоляції відбудеться при критичному струмові

$$I_{кр} \geq \frac{U_{50\%}}{R_i(1-k)}. \quad (15.11)$$

Звідки видно, що ймовірність перекриття  $P_{пер}$  тим менша, чим нижчий опір  $R_i$  або більший критичний струм  $I_{кр}$ . Тому на ЛЕП-35 кВ з металевими опорами без тросів необхідно використовувати додаткові заземлювачі для зменшення опору заземлення  $R_i$ .

### 15.3 Удар блискавки в землю поблизу ЛЕП

Він викликає індуковані перенапруги на проводах ЛЕП, які мають електричну і магнітну складові:

$$U_{інд} = U_{ie} + U_{im} \quad (15.12)$$

Величина електричної складовий індукованої перенапруги пропорційна лінійної густини зарядів  $\sigma$  лідерного каналу, середній висоті підвісу проводу  $h_{сер}$  і зворотно пропорційна відстані  $b$  до точки удару блискавки

$$U_{i.e.} = k_e \frac{h_{сер}}{b} I_{\sigma}, \quad (15.13)$$

$k_e$  – коефіцієнт пропорційності, залежний від тривалості  $\tau$  фронту розряду.

Магнітна складова розряду (індукована в петлі: опора-гірлянда-провід-земля) також зворотно пропорційна відстані  $b$ :

$$U_{i.m.} = k_m \frac{h_{сер}}{b} I_{\sigma} \quad (15.14)$$

$k_m$  – коефіцієнт, залежний від швидкості проходження головного розряду.

Максимальне значення індукованої напруги дорівнює:

$$U_{інд} = (k_e + k_m) \cdot \frac{h_{сер}}{b} \cdot I_{\sigma} \approx 30 \frac{h_{сер}}{b} \cdot I_{\sigma}. \quad (15.15)$$

Статистика свідчить, що індукована перенапряга перевищує імпульсну міцність ізоляції ЛЕП-35 кВ менш ніж 2 рази на рік ( $U_{50\%} = 350$  кВ), а імпульсну міцність ЛЕП-110 кВ ( $U_{50\%} = 700$  кВ) – 1 раз на 5 років. Таким чином, для ЛЕП-110 і вище індуковані перенапряги практично безпечні.

#### 15.4 Грозостійкість ЛЕП з тросами

Причинами грозових відключень ЛЕП з тросами можуть бути:

- удар блискавки в трос і перекриття його на провід;
- прорив блискавки на провід;
- удар блискавки в опору і перекриття на провід.

Розглянемо удар блискавки в трос у середину прольоту.

Якщо трос заземлений ( $R_i \ll Z_{mp}$ ) і приймаємо косокутну форму струму блискавки, то можна розрахувати наведену напругу на проводі. До приходу імпульсів, відбитих від опору  $R_i$  заземлення сусідніх опор, напруга на тросі дорівнює:

$$U_{mp}(t) = i_{\phi}(t) \frac{Z_{mp}}{2} = a \cdot t \cdot \frac{Z_{mp}}{2}, \quad (15.16)$$

де  $a = di/dt$  – крутість фронту імпульсу, кВ/мкс.

Через проміжок часу:  $t = \tau = l / V$  ( $l$  – довжина прольоту,  $V$  – швидкість хвилі) до місця удару одночасно підійдуть імпульси, відбиті зі зміною знаку від опору заземлення двох найближчих опор і зростання напруги припиниться. Тоді максимальна напруга на тросі складає:

$$U_{mp.max} = \frac{a \cdot Z_{mp} \cdot l}{2V}, \quad (15.17)$$

і залежить тільки від крутості імпульсу  $a$  і не залежить від амплітуди струму блискавки  $i_{\phi}$ . Напруга між тросом і проводом

$$U_{mp-np} = (1 - k) \cdot \frac{a \cdot Z_{mp} \cdot l}{2V}, \quad (15.18)$$

де  $k$  – коефіцієнт електромагнітного зв'язку між тросом і проводом.

Удар блискавки в трос у середину прольоту є розрахунковим випадком для вибору відстані між тросом і проводом за умови відсутності перекриття між ними:

$$U_{mp-np} \leq U_{p50\%}, \text{ звідки: } U_{p50\%} \geq \frac{a \cdot Z_{mp} \cdot (1-k) \cdot l}{2V}. \quad (15.19)$$

Досвід свідчить, що імовірність такого перекриття досить мала, якщо відстань трос-провід складає не менше 2% довжини прольоту  $l$ , що зазвичай завжди витримується.

Розглянемо удар блискавки у вершину опори (рис. 15.1)

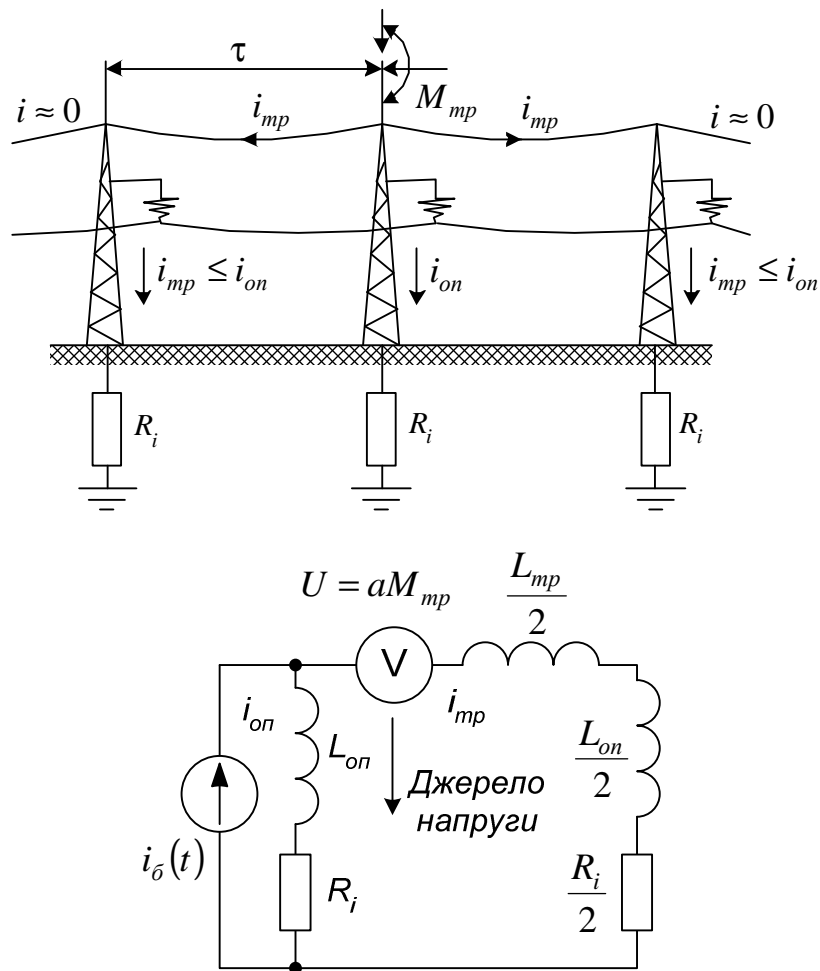


Рисунок 15.1 – Розподіл струмів та схема заміщення при ударі блискавки в опору



Тут  $M$  – коефіцієнт індукції;  $M_{mp} \approx 0.5h_{mp}$  – джерело напруги;  $i_m = a \cdot t$  – джерело струму. Частку ударів блискавки в опори можна оцінити як  $4h_{on} / l$ . Тоді число ударів блискавки в опори дорівнює

$$n_{on} = n_{y\partial} \frac{4h_{on}}{l}, \quad (15.20)$$

де  $n_{y\partial}$  – число ударів у лінію,  $l$  – довжина прольоту.

При ударі блискавки в опору весь струм спочатку йде через її тіло і заземлення. Час пробігу імпульсу по опорі на порядок менше тривалості фронту струму блискавки, тому опору в схемі заміщення представляють зосередженою індуктивністю  $L_{on} = L_0 \cdot h_{on}$  і імпульсним опором заземлення  $R_i$ . Для зосереджених заземлювачів можна знехтувати їхньою індуктивністю, яка набагато менша індуктивності опори. (питома індуктивність опори  $L_0 \approx 0.5$  мкГн/м).

Для реальних значень тривалості фронту імпульсу ( $\tau_\phi \leq 10l/c \approx 20$  мкс) і  $R_i \leq 20$  Ом достатньо враховувати відбиття від двох найближчих опор. В еквівалентній схемі обидва прольоти ліворуч і праворуч замінюються послідовним ланцюжком  $L_{mp}/2$ ,  $L_{on}/2$  і  $R_i/2$ . Потенціал вершини опори:

$$U_{on} = i_{on}(t)R_i + L_{on} \frac{di_{on}}{dt} + M_{on} \frac{di_m}{dt}, \quad (15.21)$$

де  $M_{on}$  – коефіцієнт взаємної індукції каналу блискавки й опори:

$$M_{on} \approx M_0 \cdot h_{on}, \quad M_0 \approx 0.2 \text{ мкГн/м.}$$

Струм в опорі визначають за схемою заміщення з джерелом струму –  $i_m = a \cdot t$  і джерелом напруги –  $aM_{mp}$ , що враховує напругу, яка наводиться в петлі «трос-земля» магнітним полем каналу блискавки:  $M_{mp} \approx 0.5h_{mp}$ . Струм в опорі в межах фронту імпульсу дорівнює:

$$i_{on} = a \cdot t \left[ \frac{0.5L_{mp} - M_{mp}}{0.5L_{mp} + L_{on}} \right] \frac{1 - e^{-\alpha t}}{\alpha t}, \quad (15.22)$$

$$\text{де } \alpha = \frac{R_i}{0.5L_{mp} + L_{on}}, \quad L_{mp} = Z_{mp} \frac{l}{V} = \left( 0.18 \ln \frac{2h_{mp}}{r_{mp}} \right) \cdot l \quad (15.23)$$

Потенціал проводу, таким чином, буди мати три складові:

- робоча напруга;
- напруга, індукована зарядом лідера блискавки;
- напруга, індукована імпульсом, що поширюється в тросі з амплітудою  $U_{on}$ .

Вплив робочої напруги враховують, вважаючи, що хоч на одній фазі миттєве значення  $U_{ном}$  протилежне напрузі на вершині опори:

$$U_{роб} = \frac{2}{\pi} \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}} \sqrt{2} \approx 0.5U_{ном}, \quad (15.24)$$

тобто розрахункове значення  $U_{роб}$  приймають рівним середньому значенню за півперіод перенапруги;

Електрична складова індукована при ударі в опору буде такою

$$U_{інд} \approx E_{сер} h_{сер} (1 - k), \quad \text{тут } E_{сер} \approx 10 \text{ кВ/см} - \text{ середня напруженість}$$

електричного поля в проміжку між каналом лідера блискавки і опорою. Напруга  $U_{інд}$  має полярність, зворотну полярності потенціалу опори.

Третя складова виникає на проводі при проходженні імпульсу струму по тросу:  $U_{інд} = k \cdot U_{on}$ . Отже, напруга на лінійній ізоляції дорівнює різниці потенціалів вершини опори і проводу в максимумі струму блискавки

$$U_{із} = U_{on} - U_{пр} = U_{on} - (-U_{роб} - U_{інд} + k \cdot U_{on}) = U_{on} (1 - k) = U_{роб} + U_{інд} \quad (15.25)$$

Звідки випливає, що  $U_{із}$  залежить від крутості фронту струму блискавки  $\alpha$ , що при заданому  $\tau_{ф}$  визначає максимальне значення струму блискавки:

$$I_{б} = \alpha \cdot \tau_{ф}.$$

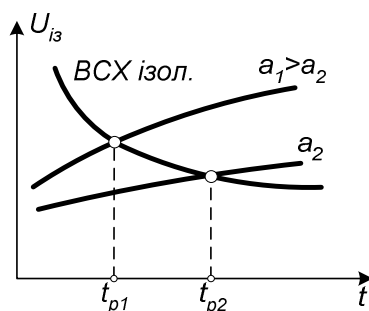


Рисунок 15.2 – Визначення часу розряду  $t$  лінійної ізоляції при різних крутизнах фронту імпульсу  $a$

Побудувавши залежність  $U_{iz}(t)$  при різній крутості фронту  $a$ , точки перетину цих кривих із ВСХ ізоляції визначають тривалість фронту струму блискавки  $\tau_\phi = t_p$  і мінімальне значення амплітуди струму, при якому відбудеться перекриття ізоляції (рис. 15.2). За цими даними можна побудувати *криву небезпечних параметрів*, що обмежує ділянку сполучення крутості і струму блискавки, при яких відбувається перекриття ізоляції лінії (рис. 15.3).

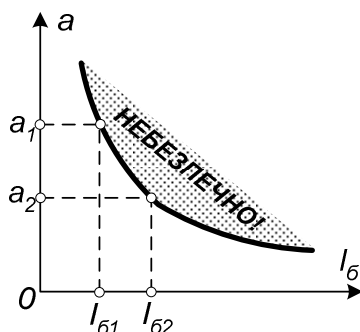


Рисунок 15.3 – Крива небезпечних параметрів крутості і струму блискавки

При крутості  $a_1$ , перекриття відбувається при струмах блискавки більше за  $I_{б1}$ , а при крутості  $a_2$  — при струмах більше за  $I_{б2}$ .

### 15.5 Визначення ймовірності перекриття ізоляції

Ймовірність перекриття ізоляції підлягає закону нормального розподілу і визначається за формулою

$$P_{on} = \iint_D f(I_\phi, a) \cdot dI_\phi \cdot da, \quad (15.26)$$

де  $f(I_{\sigma}, a)$  – двовимірна функція густини імовірності максимального значення крутості струму блискавки (рис. 15.4).

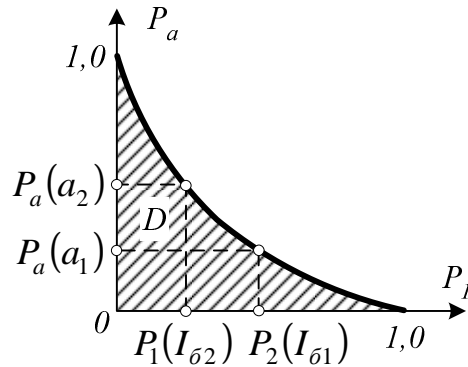


Рисунок 15.4 – Визначення імовірності перекриття ізоляції

Спрощено імовірність перекриття при ударі блискавки в опору визначається за величиною критичного струму блискавки:

$$I_{кр} = \frac{U_{50\%}}{R_i + \delta \cdot h_{он}}, \quad (15.27)$$

де  $\delta = 0.15$  – для ЛЕП з двома тросами;  $\delta = 0.3$  – для ЛЕП з одним тросом. Очевидно, у ЛЕП з 2 тросами величина  $I_{кр}$  більша, а збільшення висоти опори  $h_{он}$  знижує  $I_{кр}$ .

Імовірність прориву блискавки через тросовий захист визначають згідно експериментальних даних за емпіричною формулою:

$$\lg P_{\alpha} = \frac{\alpha \sqrt{h_{он}}}{90} - 4, \quad (15.28)$$

де  $\alpha$  – захисний кут.

Існує сильна залежність імовірності  $P$  прориву блискавки від потенціалу проводу  $U_{пр}$ :

- для ВЛ 500 кВ,  $P = 0.287\%$ ;
- для ВЛ 750 кВ,  $P = 0.92\%$ .

Питоме число грозових відключень ЛЕП з тросами залежить від висоти опори  $h_{on}$  і опору заземлення  $R_{im}$  і визначається за формулою

$$n_{відкл} = 4h_{mp} \left\{ P_{\alpha} P_{np} \eta_i + (1 + P_{\alpha}) \left[ \frac{4h_{on}}{l} P_{on} \eta_i + \left( 1 - \frac{4h_{on}}{l} \right) P_{mp} \eta_2 \right] \right\}, \quad (15.29)$$

тут  $P_{\alpha}$  – імовірність ураження проводів;

$P_{on}$  – імовірність перекриття ізоляції при ударі в опору;

$P_{mp}$  – імовірність пробою проміжку трос-провід при ударі в середину прольоту троса;  $\eta_i$  – імовірність утворення дуги при перекритті ізоляції;  $\eta_2$  – імовірність утворення дуги при пробіі повітряної ізоляції.

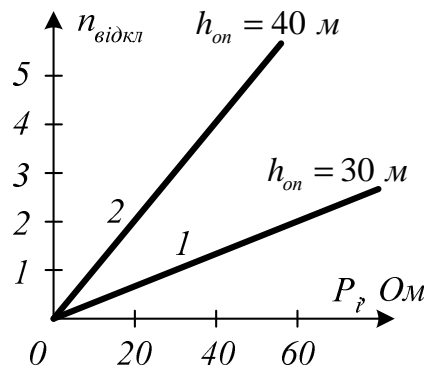


Рисунок 15.5 – Питоме число грозових відключень одноцепних (1) і двоцепних (2) ліній залежно від імпульсного опору заземлення

З рисунку 15.5 випливає, що двоцепні лінії, які мають більшу висоту підвісу, відключаються значно частіше, ніж одноцепні.

Прольоти перетинів ЛЕП між собою необхідно захищати розрядниками по обидва боки (від амплітуди перенапруг). Оскільки удар блискавки в проліт ЛЕП з різними номінальними напругами призводить до аварій, імпульсний опір заземлення опор прольоту не повинен бути вище за 10÷20 Ом.

Запитання для самоконтролю

1. Від яких факторів залежить число відключень ЛЕП?
2. Як можна зменшити число несанкціонованих відключень ЛЕП?
3. Чим визначається амплітуда перенапруги при ударі блискавки?

4. Розглянути випадок: удар блискавки в землю поблизу ЛЕП.
5. Проаналізувати випадок: удар блискавки в трос.
6. Розглянути випадок: удар блискавки в опору ЛЕП.
7. Як визначити допустиму крутизну імпульсу перенапруги?
8. Яка методика розрахунку імовірності перекриття ізоляції?
9. Як впливають параметри заземлення на грозостійкість ЛЕП?
10. Чим визначається грозостійкість ЛЕП без тросів?

## 16 ЗАХИСТ ПІДСТАНЦІЙ ВІД ПЕРЕНАПРУГ

### 16.1 Захист підстанцій від ударів блискавки

Блискавкозахист підстанцій здійснюють стрижневими блискавковідводами на порталах, щоглах та дахах споруд. Стационарний опір протяжних заземлювачів для підстанцій 110 кВ і вище, який виготовляється у вигляді сітки з горизонтальних смуг, з'єднаних вертикальними електродами, не повинен перевищувати  $R = 0.5$  Ом.

Прийнявши імпульсний коефіцієнт  $\alpha_i = 1$ , для portalу  $h = 15$  м при струмі блискавки 60 кА і крутості фронту 30 кА/мкс, напруга  $U_n = I_0 R_i + a L_0 l$  складає 780 кВ, що перевищує імпульсну розрядну напругу гірлянд ізоляторів у відкритих ВРП-110 кВ і вдвічі нижче ніж у ВРП-220 кВ. Тому в ВРП-220 кВ рекомендується установка блискавковідводів на порталах підстанції, а в ВРП-110 кВ потрібний розрахунок, – на якій відстані безпечно їх встановлювати. Для зменшення імпульсного опору  $R_z$  влаштовують додаткові вертикальні електроди, які приєднують до заземлюючого контура.

У підстанціях 35 кВ нейтралі трансформаторів приєднують до землі через дугогасний реактор. Але і при цьому опір заземлювача  $R_z$  повинен бути  $R_z \leq 10$  Ом. Підстанційні будинки і споруди захищають заземленим залізним дахом або металевією сіткою з чарункою  $5 \times 5$  м<sup>2</sup>.

## 16.2 Захист підстанцій від набігаючих імпульсів перенапруг

При ударі блискавки в трос або провід імпульс перенапруги, що поширюється по лінії, деформується і загасає. За рахунок імпульсної корони й опору землі фронт імпульсу подовжується і знижується його амплітуда. Зниження амплітуди  $U$  здійснюється за рахунок активних утрат струму блискавки в землю.

Основними апаратами захисту електрообладнання підстанцій від набігаючих імпульсів перенапруг є розрядники РВ й обмежувачі перенапруг нелінійні ОПН. Умова забезпечення захисту: – імпульсний струм через розрядник не повинен перевищувати струм координації, інакше  $U_{ocm}$ , яка виділяється на варисторі розрядника, буде небезпечна для ізоляції електрообладнання.

При близьких до станції ураженнях проводу струм блискавки  $I_{\sigma}$  розподіляється зворотно-пропорційно відносно опору заземлення та опору РВ. Тоді струм, що протікає через розрядник:

$$I_{PB} = I_{\sigma} \frac{R_3}{R_{PB} + R_3}. \quad (16.1)$$

Опір РВМГ-110 при струмі координації  $I_k = 110$  кА дорівнює:

$$R_{PB} = \frac{U_{ocm}}{I_k} = \frac{295}{10} = 29.5 \text{ Ом}. \quad (16.2)$$

Тоді при струмі блискавки  $I_{\sigma} = 60$  кА і опору заземлення  $R_3 = 10$  Ом струм через РВ буде дорівнювати 15 кА – що є неприпустимо! Таким чином, удари блискавки в лінію поблизу підстанції неприпустимі, тому ділянки лінії 1÷3 км на підході до підстанції захищають тросами (рис. 16.1). Це так звані *захищені підходи* до ПС.

Віддалені удари блискавки в провід приводять до появи в РВ струму, меншого ніж  $\frac{2U_{50\%}}{Z}$ . Так, для ВЛ-110 кВ:  $R_{PB} < \frac{2 \cdot 660}{300} = 4.4$  кА, що менше за струм координації.

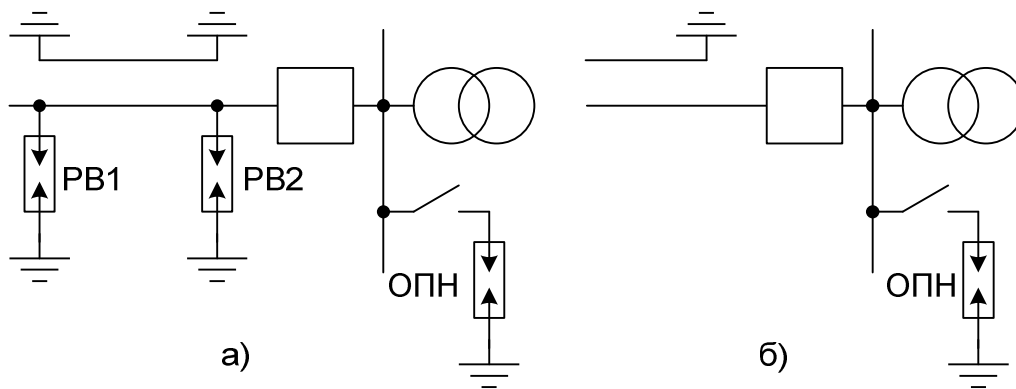


Рисунок 16.1 – Захищений підхід до підстанції: *а* – дерев’яні опори; *б* – металеві й залізобетонні опори

Навіть за наявності троса біля підстанцій вживають спеціальні заходи блискавкозахисту: зменшують опір заземлення, опор і захисні кути тросових блискавковідводів.

Ще одна функція захищеного підходу – зменшення крутизни фронту імпульсу, що набігає на підстанцію, завдяки імпульсній короні. Довжина захищеного підходу має бути достатньою для зниження крутизни фронту до безпечної для захисних апаратів та електрообладнання підстанцій величини, яка визначається експериментально.

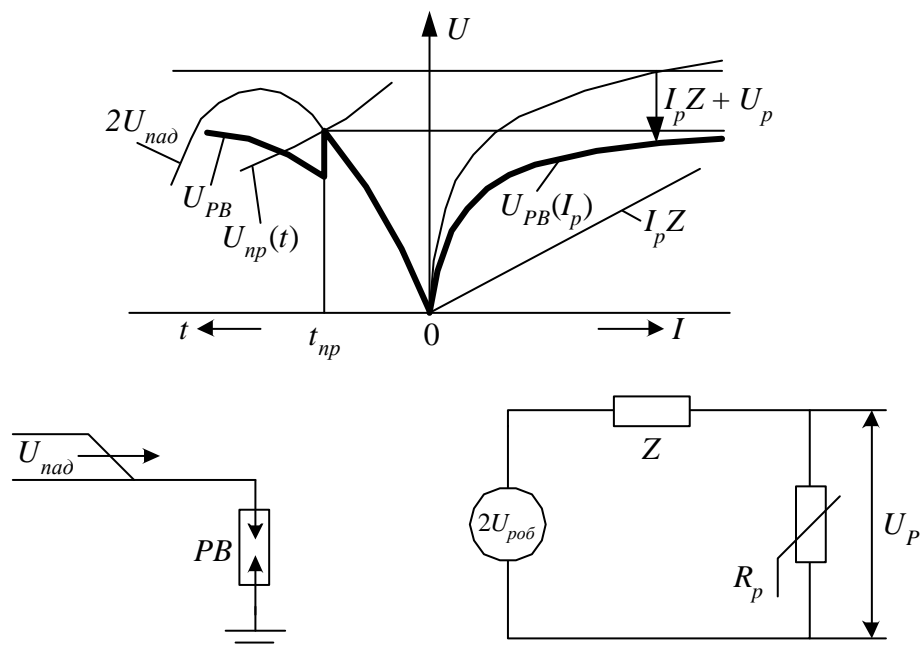


Рисунок 16.2 – Еквівалентна схема та графік напруги на розряднику



Для еквівалентної схеми підключення розрядника із зосередженими параметрами дійсне рівняння:

$$2U_{nod} = I_p Z + U_p, \quad (16.3)$$

де  $U_{np}(t)$  – ВСХ розрядника;  $U_{PB} = f(I_p)$  – ВАХ розрядника.

Сумісне вирішення цього рівняння з графічно заданим рівнянням ВАХ розрядника  $U_{pв} = f(I_p)$  дає змогу визначити напругу на розряднику  $U_{PB}$  при набіганні на нього імпульсу перенапруги  $U_{nad}$ . До пробію РВ відбувається відбиття від точки приєднання розрядника набігаючого імпульсу з тим же знаком і напруга на РВ подвоюється. Після пробію включається нелінійний опір  $R_{PB}$ , внаслідок чого напруга на  $U_{PB}$  стає  $\approx U_{ocm}$ . На підстанціях розрядники підключені на деякій відстані від електрообладнання, тому на них напруга буде вищою, ніж в точці приєднання розрядника (рис.16.3), що може бути небезпечним для ізоляції.

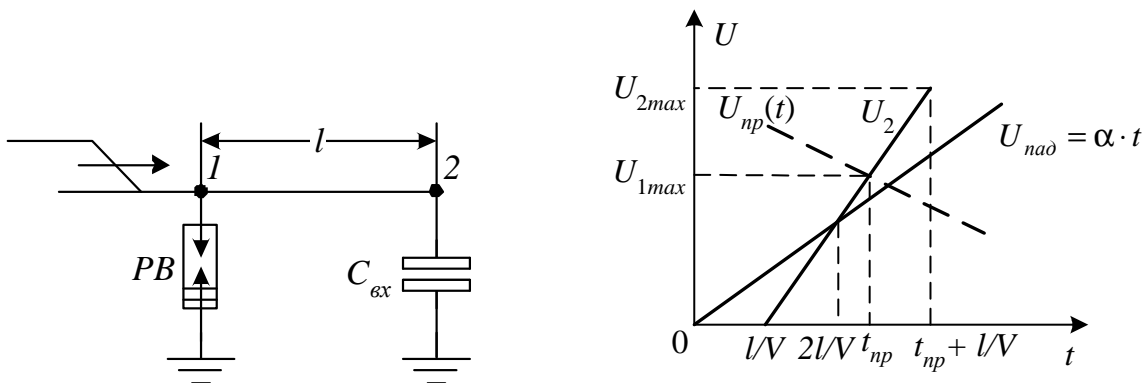


Рисунок 16.3 – Визначення напруги на обладнанні на відстані  $l$  від РВ

Визначимо цю різницю. Нехай набігаючий імпульс:  $U_{nad} = \alpha \cdot t$ . Для спрощення вважаємо  $C_{ex} \approx 0$ . Тоді через проміжок часу  $l/V$  імпульс прийде в точку 2 і відіб'ється з тим же знаком, а повернувшись в точку 1, він накладається на набігаючий імпульс. Внаслідок цього, в момент  $t_p$ , у відповідності з ВСХ  $U_{np}(t)$ , відбудеться пробій РВ і напруга в точці 1 зменшиться. Найбільша напруга на розряднику перед пробієм:

$$U_{1max} = a \cdot t_p + a \left( t_p - \frac{2l}{V} \right). \quad (16.4)$$

Напруга в точці 2 буде підвищуватися ще на протязі часу:  $t = l/V$  і досягне величини:  $U_{2max} = 2a \cdot t_p$ , а після пробою РВ почне знижуватися внаслідок підключення в точці 1 опору РВ і зміни коефіцієнтів переломлення і відбиття  $\alpha$  і  $\beta$  в точці 1. Різниця напруг на об'єкти і розряднику РВ буде:

$$\Delta U = U_{2max} - U_{1max} = 2a \cdot t_p - a \cdot t_p - a \cdot \left( t_p - \frac{2l}{V} \right) = \frac{2al}{V}. \quad (16.5)$$

Таким чином, напруга на захищеному об'єкті залежить від відстані відключення розрядника і крутизни фронту імпульсу.

Отже максимальна напруга на електроустановці тим більше перевищує пробивну напругу РВ, чим далі воно розташовано від РВ і більша крутизна фронту імпульсу. Різниця  $\Delta U$  називається *інтервалом координації ізоляції* між допустимою напругою на трансформаторі і пробивною напругою розрядника. Оскільки  $U_{проб.РВ} \approx U_{ост}$  при струмі координації  $I_k$ , задача полягає у виборі інтервалу координації між  $U_{ост.РВ}$  і допустимою напругою  $U_{дон}$  на ізоляції електрообладнання. Отже, метою розрахунку блискавкозахисту електроустановки є визначення місця розміщення РВ, відносно електрообладнання, при якому напруга на електроустановці не перевищує  $U_{дон}$ .

Ізоляцію випробовують повними і зрізаними імпульсами, причому амплітуда зрізаного імпульсу може бути на 25% вища за амплітуду повного.

Допустима напруга на електроустановці за умовою роботи внутрішньої ізоляції визначається таким чином

$$U_{дон} = 1.1(U_{ні} - 0.5U_{ном}). \quad (16.6)$$

тут 1,1 – коефіцієнт, що враховує різницю грозового і випробувального імпульсу,  $U_{ні}$  – випробувальна напруга при повному імпульсі для трансформатора,  $U_{ном}$  – діюча величина номінальної напруги. Допустимі напруги  $U_{дон}$  ізоляції повинні знаходитись нижче ВСХ ізоляції, яка визначається рівнянням

$$U(t) = A \cdot \sqrt{1 + \frac{T_0}{t}}, \quad (16.7)$$

де  $A$ ,  $T_0$  – постійні, що визначаються підстановкою випробувальних напруг повним і зрізаним імпульсом при  $t = 10$  мкс і  $t = 2$  мкс. в вираз (16.7).

Інтервал координації ізоляції для різних мережевих напруг коливається в межах 25÷40% пробивної напруги вентильного розрядника. Розрядник забезпечує необхідний інтервал координації при відстані  $l$  від захищеного обладнання не більш ніж 30÷50 м, причому підстанціям з меншим  $U_{ном}$  – відповідають менші відстані  $l$ .

### 16.3 Визначення довжини захищеного підходу до підстанції

Визначення довжини захищеного підходу полягає в знаходженні критичної крутизни набігаючих імпульсів перенапруги. Для цього експериментально визначають криві максимально допустимих напруг  $U_{max}$  в різних точках підстанції в залежності від крутизни набігаючих імпульсів  $a$  (рис. 16.4).

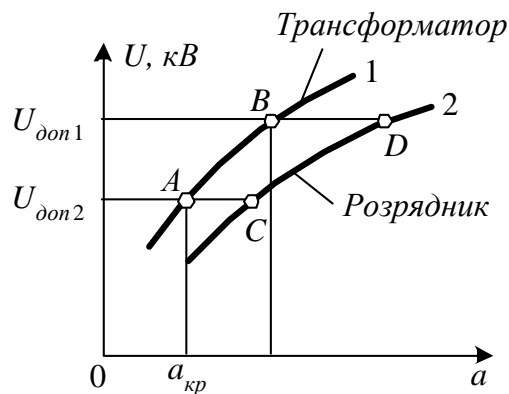


Рисунок 16.4 – Визначення критичної крутизни набігаючого імпульсу:  $U_{дон1}$  – на внутрішній ізоляції,  $U_{дон2}$  – на зовнішній

Точки перетину  $A$  і  $B$  дають величину критичної крутизни  $a_{кр}$ , перевищення якої призведе до появи на ізоляції напруги, вищу за допустиму. Найменша крутизна (точка  $A$ ) є критичною для всієї підстанції в цілому, тому імовірність пошкодження ізоляції обладнання підстанції дорівнює імовірності

приходу на підстанцію хвилі з крутизною  $a > a_{кр}$ . Довжину захищеного підходу до підстанції знаходимо за формулою

$$l_{з.п.} \geq \frac{U_{50\%}}{a_{кр} \Delta\tau_{\phi}}. \quad (16.8)$$

#### 16.4 Особливості захисту підстанцій різної номінальної напруги

На підстанціях до 110 кВ і ПС-150÷220 кВ, обладнаних трансформаторами з підвищеним рівнем ізоляції, скоординованим з характеристиками РВС, місце їх встановлення повинно забезпечити захист усього обладнання мінімальним числом розрядників. Між РВС і трансформатором 220 кВ з основним рівнем ізоляції, а також автотрансформатором, трансформатором і шунтуючими реакторами 330÷750 кВ не припустимо встановлення комутаційних апаратів.

Обладнання підстанцій 330÷500 кВ треба захищати не менш, ніж двома комплектами РВП, а 750÷1150 кВ – трьома комплектами, – для зниження амплітуди струму і зменшення падіння напруги на розряднику.

На відміну від ЛЕП-220 кВ, в лініях СВН використовують комбіновані розрядники РВМК або ОПН, що захищають від комутаційних перенапруг кінець лінії разом з компенсуючими реакторами.

При набіганні грозових імпульсів на вхід трансформаторів з ізолюваною нейтраллю в обмотках виникають коливання, що призводять до значного збільшення напруги на нейтралі, тому до неї може бути підключений РВ з номінальною напругою на клас нижчою, ніж клас ізоляції трансформатора. Якщо відстань між обладнанням і розрядником  $l \leq 10$  м, немає потреби обмежувати крутизну набігаючого імпульсу. Це притаманно невеликим підстанціям (так званим комплектним 35÷220 кВ), приєднаних до транзитних ліній за допомогою відпайок. Завдання захисту полягає у виключенні ударів блискавки поблизу РВ, які можуть пошкодити самий розрядник. Якщо лінія без захисного троса, то необхідні два послідовно приєднаних розрядника, а

ближче до підстанції проліт захистити тросом. Відпайку також необхідно захищати тросом по всій довжині (рис. 16.5).

Розподільчі пристрої 3÷10 кВ захищають від набігаючих імпульсів виносом додаткового комплекту розрядників на лінію. Дуже велика відстань між розрядниками небезпечна через можливість удару блискавки між ними, а мала – через можливість неспрацьовування розрядників, винесених на лінію. Оптимальна відстань між ними повинна бути 150÷300 м.

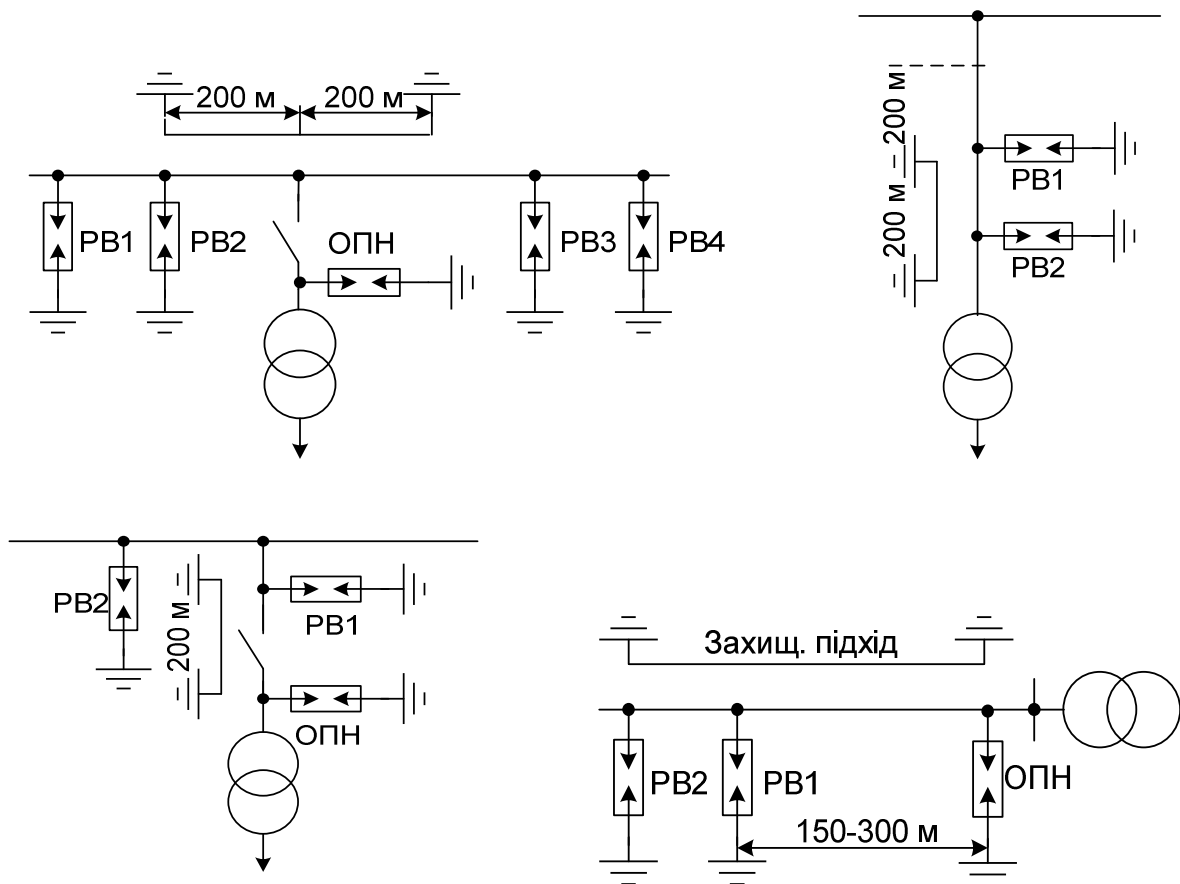


Рисунок 16.5 – Схеми захисту підстанцій розрядниками

### 16.5 Ефективність захисту електрообладнання підстанцій

Ефективність захисту підстанцій характеризується середнім річним числом перекриття ізоляції внаслідок прориву блискавки в зону захисту  $\beta_1$ , зворотних перекриттів при ударах у блискавковідвід  $\beta_2$ , перекриттів від набігаючих імпульсів  $\beta_3$ .

Середнє число перекриттів ізоляції підстанції через прорив блискавки в зону захисту:

$$\beta_1 = n_{y\partial} \cdot P_{np} \cdot P_{nep} \frac{D_z}{100}, \quad (16.9)$$

де  $n_{y\partial}$  – число ударів блискавки в підстанцію за 100 грозових годин;  $D_z$  – число грозових годин;  $P_{nep}$  – ймовірність перекриття ізоляції при ударі блискавки в провід (визначене по  $I_{кр}$ ).

Число зворотних перекриттів при ударі блискавки у блискавковідвід.:

$$\beta_2 = n_{y\partial} (1 - P_{np}) P_{звор} \frac{D_z}{100}, \quad (16.10)$$

де  $P_{звор}$  – ймовірність зворотного перекриття при ударі в блискавковідвід (визначається по  $I_{кр}$ ). Критичний струм  $I_{кр}$  визначається із рівняння потенціалу, що з'являється на порталі і 50% імпульсної розрядної напруги гірлянди ізоляторів

$$I_{кр} \cdot R_i + 50 \cdot l = U_{50\%}. \quad (16.11)$$

Тут  $l$  – висота кріплення гірлянди на порталі;  $R_i$  – імпульсний опір заземлення. Середнє річне число перекриттів через набігаючі імпульси:

$$\beta_3 = 4h_{mp} \left\{ P_\alpha + (1 - P_\alpha) \left[ \frac{4h_{on}}{l} P_{on} + \left( 1 - \frac{4h_{on}}{l} \right) P_{mp} \frac{D_z}{100} \frac{ml_{zn}}{100} \right] \right\}, \quad (16.12)$$

де  $l_{zn}$  – довжина захищеного підходу;  $m$  – число повітряних ліній;  $P_\alpha$  – ймовірність ураження проводу;  $P_{on}$  – ймовірність перекриття ізоляції на опорі при ударі блискавки в провід;  $P_{mp}$  – ймовірність перекриття провід-трос при ударі блискавки в трос.

Показник грозостійкості підстанції – це число років безвідмовної роботи:

$$M = \frac{1}{\beta_1 + \beta_2 + \beta_3} \quad (16.13)$$

Розрахункові значення  $M$  сучасних підстанцій складають сотні років, що на порядок більше за середнього терміну служби електроустаткування.

## 16.6 Види комутаційних перенапруг

Електричні мережі високої напруги містять сконцентровані та розподілені ємності та реактивності, тому мають коливальні властивості, завдяки запасеній електричній та магнітній енергії. Причина коливань полягає в плановій або аварійній комутації електричної мережі або електроустаткування. Найбільш розповсюдженими випадками комутацій є відключення ненавантажених ліній, відключення ліній при асинхронному ході генератора, автоматичне повторне ввімкнення та ряд інших. Кожна комутація призводить до виникнення перехідних процесів, які супроводжуються виникненням перенапружень. Можливі перенапруження і при нестійкому горінні дуги при однофазному КЗ в мережі з ізольованою нейтраллю. Комутаційні перенапруги поділяються на:

- фазні, що діють на ізоляцію відносно землі;
- міжфазні, що діють на ізоляцію різних фаз;
- між контактні.

При проектуванні ізоляції конструкцій необхідно враховувати такі дані:

- кратність перенапруг:  $k = U_{max} / U_{найб.роб.}$ ;
- форму кривої перенапруги, яка визначає тривалість дії напруги на ізоляцію;
- тип електрообладнання, на яке діє перенапруга.

Оскільки ці характеристики мають статистичний розкид, то необхідно визначати ймовірність появи перенапруг на протязі певного відрізка часу. Техніко-економічне обґрунтування захисту від перенапруг базується на оцінці статистичних характеристик можливої шкоди (математичне очікування, дисперсія) від дії перенапруги. Ймовірність появи комутаційного імпульсу перенапруги є випадковим явищем і описується законом Пуассона:

$$P_{\tau}(1) = \lambda \cdot \tau \cdot e^{-\lambda \tau}, \quad (16.14)$$

де  $P_{\tau}$  – це ймовірність появи одної перенапруги за період часу  $(0, \tau)$ ;

$\lambda = \lim [P_{t, \Delta t}(1) / \Delta t]$  – інтенсивність потоку.

Річне число появи перенапруг з кратністю  $k$  дорівнює:

$$N_{k1} \approx 1,58 \cdot N_1 \cdot \exp[-A(k-k')]. \quad (16.15)$$

тут  $N_1$  – число перенапружень з кратністю  $k \geq 1,15$  за рік;  $A$  – параметр розподілу. Цей вираз дає змогу розраховувати ймовірність пробою ізоляції з врахуванням варіації її розрядної напруги. Для ПС-500 кВ річне число появи перенапруг з кратністю  $k = 1,15$  дорівнює 130.

Природа виникнення комутаційних перенапруг:

- перенапруги при відключенні конденсаторів і ненавантажених ЛЕП;
- перенапруги при відключенні ненавантажених трансформаторів;
- перенапруги при неповнофазних режимах;
- перенапруги при почергових замиканнях на землю (нестійка дуга);
- перенапруги ферорезонансні;
- перенапруги при відключенні великих струмів (після КЗ);
- перенапруги при АПВ.

При ввімкненні блочних схем: трансформатор – ЛЕП без вимикача на стороні лінії перехідний процес супроводжується появою вільних складових коливань магнітного потоку трансформатора, співпадіння яких з вимушеною складовою, призводить через  $\frac{1}{2}$  періоду промислової частоти до насичення магнітного потоку і появи висших гармонік. Оскільки вільна складова магнітного потоку затухає повільно (десятки періодів частоти 50 Гц), - перехідний процес достатньо тривалий і супроводжується значними перенапруженнями. Це явище є небезпечним для ізоляції, вентиляльних розрядників і ОПН і називається *перехідним резонансом*.

Розглянемо перенапруги, що виникають при включенні розімкненої лінії (рис. 16.6).

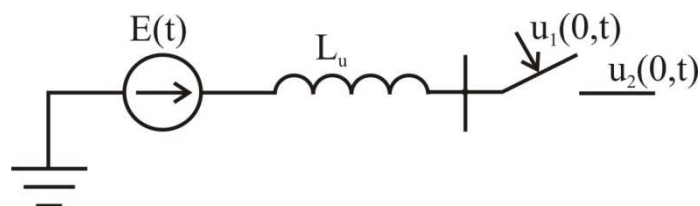


Рисунок 16.6 – Еквівалентна схема розімкненої лінії



Розімкнена лінія довжиною  $l$  з внутрішньою індуктивністю  $L$  і джерелом синусоїдальної напруги  $E(t)$  приєднується до навантаження. Внаслідок перехідних процесів в лінії виникають вимушені та вільні коливання. Амплітуди вільних коливань утворюють знакозмінний ряд, члени якого зменшуються зі збільшенням номера гармоніки.

При  $t = 0$ ,

$$A_{уст} - A_1 + A_2 - A_3 + \dots = 0, \quad (16.16)$$

де  $A_{уст}$  – амплітуда вимушеної складової,  $A_1, A_2, A_3$  – амплітуди гармонік вільних складових коливань. Звідси  $A_1 > A_{уст}$ , тобто амплітуда першої вільної гармоніки більша за амплітуду вимушеної складової. В момент часу  $t = \pi/\omega$  максимальна величина вимушеної і перших двох вільних складових співпадають

$$U_{max} \approx A_{уст} + A_1 + A_2. \quad (16.17)$$

При цьому ударний коефіцієнт, що характеризує величину перенапруги

$$K_{уд} = (U/A_{уст}) \approx (A_{уст} + A_1 + A_2)/A_{уст} = [1 + (A_1 + A_2)/A_{уст}] > 2. \quad (16.18)$$

Максимальна напруга на кінці лінії  $U_{max}$  визначається кутом включення  $\varphi$  і частотою вільних  $\omega_1$  і особистих  $\omega$  коливань, які визначають амплітуду вільних коливань  $A_i$ . Звідки при  $\omega_1/\omega > 1$  амплітуда вільних складових максимальна при кутах включення  $90^\circ$  або  $270^\circ$ . Це означає, що чим більше кут включення відрізняється від  $90^\circ$ , тим менша амплітуда особистих коливань. При  $\omega_1/\omega \leq 1$  амплітуда вільних коливань максимальна при куті ввімкнення  $0$  або  $180^\circ$ . Це можливо при ввімкненні в ЛЕП послідовно ємностей для компенсації індуктивного опору лінії (ППК – пристрій поздовжньої компенсації), який зменшує  $K_{уд}$  поблизу максимуму.

У мережах з ізольованою нейтраллю перенапруження виникають при однофазних дугових замиканнях та нестійкому горінні дуги і супроводжуються зміщенням нейтралі системи, що може бути спричинено остаточною зарядом ємностей лінії при погасанні дуги. При цьому максимальна напруга  $U_{max}$  досягає  $3,1 \cdot U_{фазне}$  і можливі масові випадки перекриття ізоляції на здорових фазах.

Електричні мережі містять велику кількість реактивних елементів – ємностей та індуктивностей, що утворюють цілий ряд коливальних контурів і, накопичивши електричну й магнітну енергію, можуть призводити до виникнення резонансних явищ при відключеннях навантаження лінії. Таки перенапруження називають *резонансними* і найбільш небезпечні серед них – *ферорезонансні*, що виникають при насиченні магнітопроводів трансформаторів та електричних машин. Їх небезпека полягає як у високих амплітудах перенапруг ( $3,8 \div 4,2$ )  $U_{\phi}$ , так і тривалості дії на ізоляцію, яка дорівнює часу існування неповнофазного режиму і може призводити до пошкодження РВ, ОПН і трансформаторів напруги. АПВ використовують для ефективного гасінні дуги шляхом відключення пошкодженої ділянки лінії з обох сторін від місця КЗ. Максимальні перенапруги виникають при повторному ввімкненні розімкненої лінії і обумовлені ємнісним ефектом та великим значенням ударного коефіцієнта.

#### 16.7 Способи обмеження комутаційних перенапруг

Комутаційні перенапруги можуть перевищувати рівні ізоляції електроустановок 330 і 500 кВ ( $2,5U_{\phi}$ ) і 750 кВ ( $2,1U_{\phi}$ ), тому використовують їх примусове обмеження такими заходами:

- обмеженням числа режимів (при яких можуть виникати перенапруги), за допомогою схемних рішень;
- обмеження амплітуд встановлених перенапруг, що призводить до зниження амплітуд перехідного процесу;
- обмеження амплітуд комутаційних перенапруг за допомогою РВ, ОПН або вмонтованих у вимикачі шунтуючих резисторів;
- підбір таких початкових значень перехідного процесу, при яких амплітуди вільних коливань мають мінімальні величини (наприклад, прискорення стікання заряду з лінії в паузу АПВ), або керування моментом включення вимикача;
- підключення лінії спочатку до більш потужної шини;
- попереднє (до комутації лінії) підключення реакторів поперечної компенсації на вищій та середній напругах.

Для зниження амплітуд комутаційних перенапруг встановлюють при ввімкненні ліній знижені коефіцієнти трансформації силових трансформаторів. Обмеження амплітуд комутаційних перенапруг відбувається або за рахунок

розсіювання енергії вільних коливань в нелінійних резисторах РВ, що ввімкнені між фазою та землею, або за допомогою резисторів, вбудованих в вимикачах. Дія шунтуючих резисторів полягає у демпфіруванні вільних коливань напруги при ввімкненні ненавантажених ліній і зменшенні остаточного заряду в лінії при її відключенні або АПВ.

Ефективним захистом від перенапруг є під'єднання паралельно контактам високовольтних вимикачів відносно землі ОПН, які суттєво обмежують число повторних запалювань дуги і, тим самим, виключають можливість віртуальних зрізів струму. Крім того, ОПН обмежує перенапруги при обриві струму. Так, при відключенні пускового струму електродвигунів 630 кВт з кабелем 250 м, відключення відбулось з 5-ю повторними пробоями, а без ОПН – з 11. Використання ОПН можливо і для обмеження дугових перенапруг, що підтверджено експериментально при таких умовах:

- ввімкнення та відключення холодного електродвигуна;
- відключення та ввімкнення при ОДЗ зі сторони живлючої мережі;
- неповнофазні комутації електродвигуна з кабелем;
- штучне збудження дугового замикання на землю;
- відключення та миттєве ввімкнення;
- ввімкнення та миттєве відключення.

ОПН суттєво обмежує перенапруги з рівнем  $2U_{\text{фmax}}$  і струмами  $I_{\text{max}} \leq 100\text{А}$ , при  $\tau_i = 100$  мкс.

Запитання для самоконтролю

1. Які методи захисту підстанцій від набігаючих перенапруг?
2. Як визначити довжину захищеного підходу до підстанції?
3. Назвіть загальні причини виникнення комутаційних перенапруг.
4. Наведіть класифікацію комутаційних перенапруг.
5. Як визначити імовірність появи комутаційної перенапруги?
6. Назвіть види комутаційних перенапруг та їх характеристики.
7. В чому причина появи *перехідного резонансу*?
8. Механізм виникнення перенапруг при комутації розімкнутої лінії.
9. Який зміст поняття «ударний коефіцієнт» при комутації лінії?
10. У чому причина виникнення *ферорезонансних* перенапруг?
11. Які існують методи обмеження комутаційних перенапруги?

## ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

### А

Атмосферні перенапруги – 9  
Амбіполярна дифузія – 19  
Автоелектронна емісія – 20,81  
Атмосферні опади – 43  
Акустичний шум – 45  
Амплітуда імпульсу – 50  
Активний опір – 72  
Аморфні діелектрики – 89  
Абсорбція – 99  
Апарати захисту – 119

### Б

Бар'єрний ефект – 29  
Біполярна корона  
Біполярна корона – 42  
Електростатичний радіус  
Блискавки струм – 57  
Блискавковідводи – 61  
Блискавко захист – 148

### В

Вторинна електронна емісія – 20  
Вторинні електрони – 21  
Внутрішня ізоляція – 36  
Втрати електроенергії – 46  
Вольт-секундна характеристика – 49  
Випробувальний трансформатор – 107  
Вводи високовольтні – 112  
Вентильний розрядник – 122  
Відбиття коефіцієнт – 133

### Г

Грозові перенапруги – 8  
Грозостійкість ЛЕП – 9, 138  
Газові діелектрики – 12  
Гази електронегативні – 14  
Градiєнт потенціалу – 28  
Градирування ізоляції – 34  
Головний розряд – 53

### Д

Дифузія – 16  
Довгі повітряні проміжки – 52  
Дуговий розряд – 78, 81  
Дуги часткові – 78  
Довжина шляху витоку – 80  
Дисоціація – 73  
Діелектрики – 73  
Діелектричні втрати – 109  
Довгоіскрові розрядники – 127

### Е

Електродинаміка – 7  
Електрони – 15  
Електромагнітні процеси – 12  
Електромагнітні хвиди – 17  
Електростатичний радіус лавини – 20, 58  
Ефект полярності – 29  
Електрична міцність – 33,77  
Електричній пробій – 90  
Електричні старіння – 114  
Енергія активації – 118

### З

Заряд ядра – 15  
Збудження атома – 16  
Зона іонізації – 41  
Зворотне перекриття – 60  
Зона захисту – 62  
Заземлення – 69  
Зовнішнє середовище – 79  
Захисний проміжок – 120  
Захищений підхід – 149  
Захист підстанцій від набігаючих імпульсів – 148

### І

Ізоляція – 7  
Іонізація – 16  
Ізолятори – 33, 112

Гідрофобні покриття – 81  
Головна ізоляція – 95  
Іскрова зона – 71  
Імпульсний коефіцієнт – 71  
Індуктивний опір – 72  
Іскровий ефект – 73  
Іонізаційний проміжок – 92  
Імпульсна корона – 135  
Імовірність перекриття – 137,147  
Інтервал координації ізоляції-153

## К

Координація ізоляції – 10  
Комбінована ізоляція – 11  
Коефіцієнт ударної іонізації- 18  
Коефіцієнт дифузії – 19  
Коефіцієнт вторинної іонізації-22  
Кінетична енергія електрона – 22  
Конденсаторні обкладинки – 36  
Коронний розряд – 39  
Коефіцієнт не гладкості проводів-40  
Коефіцієнт імпульсу – 51  
Канал ковзного розряду – 75  
Крутість фронту імпульсу – 76  
Коефіцієнт кумулятивності – 92  
Контроль ізоляції – 103  
Коефіцієнт гасіння – 123  
Коефіцієнт заломлення – 134  
Коефіцієнт відбиття – 134  
Комутаційні перенапруження – 158

## Л

ЛЕП – 9  
Лавина електронів – 14  
Лавинного розряду теорія -24  
Лідер – 52  
Лідера канал – 53

## М

Маса електрона – 16  
Маса протона – 19  
Між електродний проміжок – 30  
Масло трансформаторне – 84  
Механізм пробою – 89  
Міграційна поляризація – 98

Імпульсна напруга – 49  
Індуктовані заряди – 56

## Н

Найбільша допустима напруга – 8  
Несамостійний розряд –21  
Напруга розряду –23  
Напруженість поля – 27  
Напівпровідникові покриття –38  
Напруга мокро розрядна –104  
Напруга випробувальна – 105

## О

Однорідне поле – 25  
Однорідні діелектрики – 36  
Об'ємний заряд – 46  
Об'єкти захисту – 61  
Одиночний блискавідвід – 93  
Орієнтаційна поляризація – 97  
Обмежувач перенапруги – 126  
Обмеження комутаційних перенапруг – 162

## П

Перенапруга – 7, 56  
Позитивні іони – 18  
Пашена закон – 23  
Поверхня еквіпотенційна – 26  
Пробивна напруга – 50  
Перекриття ізоляції – 60  
Поверхневий розряд – 74  
Поздовжня ізоляція – 94  
Поляризація діелектриків – 96  
Показник грозо стійкості – 158

## Р

Рухливість електронів – 19  
Рухливість іонів 19  
Радіус лавини – 20  
Робота виходу електрона –21  
Рекомбінація – 21  
Регулювання електричних полів – 26  
Розщеплення фаз – 41

Маркування введів – 113  
Магнітне гасіння дуги – 123  
Середня напруга – 8  
Структура атома – 13  
Стример – 26  
Струм блискавки – 53  
Самостійний розряд – 29  
Світіння каналу блискавки-57  
Стрила прогину – 68  
Стаціонарний опір – 71  
Струм абсорбції – 101  
Старіння ізоляції – 114

### Т

Трехзарядні іони – 18  
Термоелектронна емісія – 21  
Термоіонізація – 21  
Тривалість імпульсу – 49  
Термін розряду – 51  
Тангенційна складова – 74  
Трекі – 75  
Тепловий пробій – 92  
Трансформатор – 93  
Тангенс  $\delta$  – 93  
Теплове старіння – 117  
Трубчастий розрядник – 121

### У

Ударна іонізація – 17  
Уніполярна корона – 49  
Уражаючі фактори розряду – 73  
Удар блискавки – 139. 141  
Ударний коефіцієнт – 161

### Ф

Фотоіонізація – 21  
Фазна напруга – 39  
Формування розряду - 27  
Формула Піка – 40  
Фронт імпульсу – 57  
Фарфорові ізолятори – 111

Радіоперешкоди – 47  
Реактори – 113

### Х

Характеристика запалювання  
корони – 42  
Хвиля перенапруги – 50  
Хвильові процеси в ЛЕП – 132  
Хвильовий опір – 132  
Хвиля відбита – 133  
Хвиля заломлена – 134

### Ч

Число ізоляторів гірлянди – 35  
Чохол корони – 39  
Часткові дуги – 78  
Часткові розряди – 108  
Число ударів блискавки – 136  
Число перекриття  
ізоляції – 137

### Ш

Шлях витоку струму – 78  
Штирьові ізолятори – 112

### Є

### *Список рекомендованной литературы*

1. Базуткин В. В. Техника высоких напряжений : учебник / В. В. Базуткин, Ю. С. Ларионов. – Москва : Энергоатомиздат, 1996. – 464 с.
2. Защита сетей 6-35 кВ от перенапряжений : учебник / [Под общ. ред. Ф. Х. Халилова]. – Санкт-Петербург : Энергоатомиздат, – 2002.– 270 с.
3. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и коммутационных перенапряжений / СПб : Минтопэнерго РФ.– 1999.– 353 с.
4. Ларионов Ю. С. Техника высоких напряжений (теоретические и практические основы применения) : пер. с нем. / Ю. С. Ларионов. – Москва : Энергия, 1986. – 456 с.
5. Техника высоких напряжений : учебник / [Под общ. ред. Г. С. Кучинского]. – СПб : Энергомашиздат, 2003. – 256 с.

### *Додаткова література*

6. Перенапряжения и молниезащита : учебное пособие для слушателей системы повышения квалификации и переподготовки кадров / [(Под общ. ред. В. П. Горелова]. – Новосибирск. акад. водн. трансп. – 2002. – 234 с.
7. Горелов С. В. Изоляция и перенапряжения в системах электроснабжения : учебн. пособие. / С. В. Горелов, Л. Н. Татьянченко, С. О. Хомутов ; Барнаул : Изд-во Алт. ГТУ – Барнаул, 2002. – 324 с.
8. Кучинский Г. С. Изоляция установок высокого напряжения : учебн. пособ. / Г. С. Кучинский, В. Е. Кизеветтер, Ю. С. Пинталь ; – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.
9. Чунихин А. А. Аппараты высокого напряжения : учебник / А. А. Чунихин, М. А. Жаворонков. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 432 с.
10. Неклепаев Б. Н. Электрическая часть станций и подстанций: [Учеб. пособ. для вузов] / Б. Н. Неклепаев, И. П. Крючков. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 604 с.

*Навчальне видання*

**РОЙ** Віктор Федорович

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

з дисципліни

**«ТЕХНІКА ВИСОКИХ НАПРУГ»**

*(для студентів 4 курсу денної і 5 заочної форм навчання напряму підготовки 6.050701 – Електротехніка та електротехнології та слухачів другої вищої освіти спеціальності 7.05070103 – Електротехнічні системи електроспоживання)*

Відповідальний за випуск *П. П. Рижков*

*За авторською редакцією*

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2016, поз. 240 Л

---

Підп. до друку 07.04.2016 р.  
Друк на ризографі  
Зак. №

Формат 60x84/16  
Ум.-друк. арк. 9,4  
Тираж 50 пр.

Виконавець і виготовлювач:  
Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002  
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК 4705 від 28.03.2014 р.