

ЛІТЕРАТУРА



НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНА

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя

Кафедра систем
електроспоживання та
комп'ютерних технологій
в електроенергетиці

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ З ДИСЦИПЛІНИ «Техніка високих напруг»

*для студентів
факультету прикладних інформаційних технологій
та
електроінженерії*

напряму підготування
6.050701 - електротехніка та електротехнології
й
спеціальності
141 - електроенергетика, електротехніка
та
електромеханіка

Тернопіль - 2017

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя

Кафедра систем
електроспоживання та
комп'ютерних
технологій в
електроенергетиці

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ **З ДИСЦИПЛІНИ** *«Техніка високих напруг»*

для студентів
факультету прикладних інформаційних технологій
та
електроінженерії

напряму підготування
6.050701 - електротехніка та електротехнології
й
спеціальності
141 - електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Тернопіль - 2017

Конспект лекцій з дисципліни «Техніка високих напруг» : методичні вказівки для студентів напряму підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» й спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Укл.: О. О. Вакуленко. – Тернопіль : ТНТУ, 2017. – 180 с.

Методичні вказівки розроблені з метою засвоєння теоретичного матеріалу з дисципліни «Техніка високих напруг» й містять теоретичну частину, практичні вказівки до вирішення задач ефективного функціонування високовольтного устаткування, запитання для самопідготовки та розраховані на отримання навиків визначення діелектричних втрат, електричної міцності високовольтної ізоляції, інтенсивності часткових розрядів, питомих електричних опорів, зон блискавкозахисту електроустановок і споруд на їх моделях, дефектованих ізоляторів заміром розподілу напруги вздовж гірлянди ізоляторів, а також обчислення похибок високовольтних вимірювань.

Укладач:

ст. викладач Вакуленко О. О.

Рецензент:

д.т.н., професор Євтух П. С.

Розглянуто й схвалено на засіданні кафедри систем електроспоживання та комп'ютерних технологій в електроенергетиці.

Протокол № 02 від 14 вересня 2017 року.

Розглянуто й рекомендовано до друку на засіданні методичної комісії факультету прикладних інформаційних технологій та електроінженерії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

Протокол № 02 від 26 жовтня 2017 року.

© Комп'ютерна верстка та відповідальний за випуск: Вакуленко О. О., 2017 рік

ЗМІСТ

Лекція №1	5
Вступ. Завдання курсу «Техніка високих напруг».	
Особливості функціонування нейтралей електричних мереж.	
Зовнішня і внутрішня ізоляція електроустановок.	
Лекція №2	14
Основні закони електричних полів.	
Електростатична теорема Гаусса.	
Крайовий ефект.	
Лекція №3	22
Електричне поле стандартних електродів.	
Провідні та газові включення в ізоляції.	
Лекція №4	32
Електричне поле однофазної повітряної лінії.	
Потенціальні та ємнісні коефіцієнти.	
Часткові ємності проводів.	
Лекція №5	40
Електричне поле трифазної повітряної лінії.	
Потенціальні та ємнісні коефіцієнти. Часткові ємності проводів.	
Електричне поле розщеплених проводів. Коефіцієнт шорсткості проводів.	
Лекція №6	48
Теоретичні передумови регулювання електричних полів.	
Вирівнювання електричного поля ізоляторів ЛЕП зовнішніми екранами. Градування ізоляції.	
Лекція №7	57
Регулювання електричного поля конденсаторними обкладинками.	
Застосування півпровідних покриттів.	
Лекція №8	67
Внутрішня ізоляція електроустановок.	
Ізоляція силових трансформаторів, вводів високої напруги, силових конденсаторів, кабелів, високовольтних електричних машин	
Лекція №9	76
Особливості зовнішньої ізоляції електричних установок.	
Збудження та іонізація атомів і молекул газу.	
Коефіцієнт ударної іонізації. Вторинна та термоіонізація.	

Лекція №10	88
Лавина електронів. Умова самостійності розряду. Лавинно–стрімерний розряд.	
Лекція №11	97
Розвиток розряду у проміжках з однорідним та неоднорідним електричними полями. Закон Пашена. Розвиток розряду у проміжках стандартних електродів. Застосування стандартних розрядних проміжків.	
Лекція №12	112
Розвиток коронного розряду в неоднорідному електричному полі. Втрати потужності на загальну й місцеву корони повітряних ЛЕП та способи їх зменшення. Екологічний вплив коронного розряду.	
Лекція №13	123
Статистичні закономірності розрядних процесів у зовнішній ізоляції. Вольт–секундні характеристики повітряних проміжків. Розряди в повітрі вздовж поверхні ізоляторів. Вплив ступеня забрудненості атмосфери.	
Лекція №14	139
Електричний грозовий розряд (блискавка). Основні параметри блискавки. Інтенсивність грозової діяльності.	
Лекція №15	148
Блискавковідводи та їх зони захисту. Заземлення блискавковідводів. Імпульсні характеристики заземлювачів. Умови безпечного проходження струму блискавки.	
Лекція №16	162
Блискавкозахист повітряних ліній електропередачі. Захисний рівень та число грозових відключень ліній. Грозоопірність ліній з тросами та без них. Індуковані та прямі удари блискавки.	
Рекомендована література	178

ТЕМА 1. ЗМІСТ ТА ЗАВДАННЯ КУРСУ «ТВН». ЗАКОНОМІРНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ

ЛЕКЦІЯ 1

[2, с. 12–20; 5, с. 3–11; с. 53–74; 7, с. 5–10; 8, с. 5–10; 16]

ВСТУП

В1. Зміст та завдання курсу «Техніка високих напруг»

В розвитку електроенергетики важливе місце займає застосування високих напруг для передачі електричної енергії на великі відстані. Протяжність електричних мереж високої напруги (номінальною напругою 35–330 кВ) становить в Україні десятки тисяч кілометрів, а довжина електропередач надвисокої напруги (500, 750 та 1150 кВ) – тисячі кілометрів. Одиначна потужність встановлених на електростанціях турбогенераторів зросла до 1000 МВт, а гідрогенераторів – до 500 МВт. Потужність окремих теплових електростанцій досягає 3800 МВт, атомних – 3000 МВт, а гідравлічних – 6000 МВт.

По високовольтній лінії номіналом 750 кВ економічно доцільно здійснювати передачу потужності порядку 1,5 млн. кВт на відстані до 1000 км. Застосування більш високої змінної напруги 1150 кВ дозволяє збільшити потужність передачі до (3 ... 4) млн. кВт при дальності передачі 1,5–2,0 тис. км.

При такій концентрації потужностей велике значення має надійність роботи ліній електропередачі (ЛЕП) і всього комплексу обладнання: генераторів, трансформаторів, комутаційної апаратури, компенсувальних пристроїв та ін. В значній мірі вирішення цього завдання забезпечується надійною роботою ізоляції електричних систем та обладнання при всіх постійно діючих на неї або короткочасно виникаючих напругах.

Ізоляція електричних установок постійно знаходиться під дією робочої напруги. Середня міжфазова напруга установки називається номінальною напругою. В умовах експлуатації напруги відрізняються від номінальних значень внаслідок падіння напруги на елементах установок, зумовлене струмом споживання, а також регулюванням напруги з джерел живлення.

Шкала номінальних напруг електропередачі, найбільші робочі напруги в будь-якій точці системи електропостачання у відповідності з вимогами ГОСТ 23366–78 «Ряды номинальных напряжений постоянного и переменного тока» (діючий відповідно зм. №1 від 01.01.1989 р.) наведені в табл. В1.

Таблиця В1 Номінальні та максимальні робочі напруги електричних систем (повітряні та кабельні)

$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$	3	6	10	20	35	110	150	220	330	500	750	1150
$U_{\text{роб.макс}}, \text{кВ}$	$1,15 \cdot U_{\text{ном}}$									$1,1 \cdot U_{\text{ном}}$	$1,05 \cdot U_{\text{ном}}$	
$U_{\text{фаз.макс}}, \text{кВ}$	3,5	6,9	11,5	23,0	40,5	126	172	252	363	525	787,5	1200
$U_{\text{фаз.макс}}, \text{кВ}$	2,0	4,0	6,65	13,3	23,4	72,8	100	146	210	304	455	695
Нейтраль	ізольована		заземлена через дугозагасний реактор				глухо заземлена					

$$* U_{\text{фаз.макс}} = \frac{U_{\text{роб.макс}}}{\sqrt{3}}.$$

В2. Особливості функціонування нейтралі ЛЕП

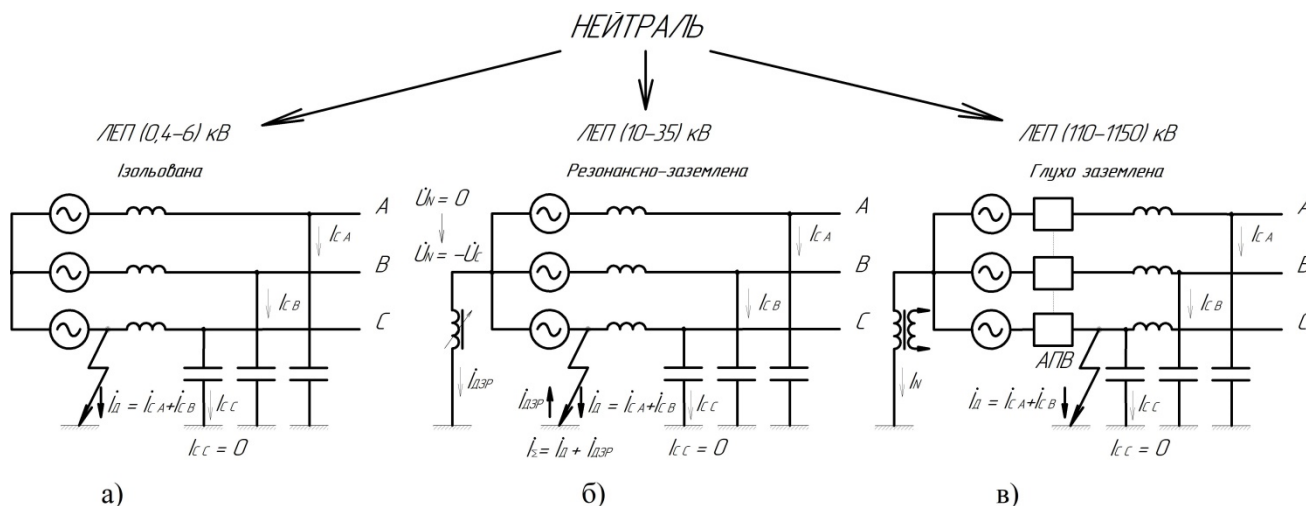


Рис. В1 - Режими функціонування нейтралі ЛЕП різних номіналів

при дугових однофазних замиканнях:

а) - ЛЕП з ізолюваною нейтраллю;

б) - ЛЕП з резонансно-заземленою нейтраллю;

в) - ЛЕП з глухо (активно) заземленою нейтраллю

Функціонування *ізолюваної нейтралі* в мережах (1 ... 6) кВ (див. рис. В1 а)).

Питомий ємнісний струм замикання на землю, тобто струм на 1 км довжини лінії і 1 кВ номінальної напруги для повітряних ліній, в середньому дорівнює (1 ... 20) $mA/км \cdot kV$ і є досить малим. Якщо блискавка попала в одну з фаз лінії електропередачі, то через місце ураження буде протікати ємнісний струм короткого замикання від двох неуражених фаз. Внаслідок малої величини цього струму коротке замикання швидко самоліквідується.

Функціонування *заземленої через дугозахисний реактор нейтралі* в мережах (10 ... 35) кВ (див. рис. В1 б)).

Питомий ємнісний струм замикання на землю кабельної лінії залежить від номінальної напруги, конструкції і перетину кабелю, але в середньому може бути оцінений величиною (90 ... 120) $mA/км \cdot kV$. Блискавковий розряд швидко переходить в небезпечний дуговий розряд і через місце замикання однієї з фаз на землю протікає значний ємнісний струм двох інших фаз. Трикутник фаз порушується і від генератора ураженої фази на нейтраль поступає фазова напруга. Внаслідок цього через дугозахисний реактор починає протікати індуктивний струм. У місці дугового замикання ємнісний струм і індуктивний струм зустрічаються у протифазі (індуктивний струм відстає від напруги на 90^0 , а ємнісний струм випереджує напругу на 90^0). Відбувається їх взаємна компенсація.

Функціонування *заземленої нейтралі* в мережах (110 ... 1150) кВ (див.

рис. В1 в)).

В цьому випадку коротке замикання на лінії ліквідується за допомогою пристроїв автоматичного повторного вмикання (АПВ). А саме: при виникненні короткого замикання лінія автоматично від'єднується від джерела живлення на час, необхідний для погасання дуги, після чого автоматично знову вмикається.

В процесі експлуатації можливі підвищення напруги понад її найбільше робоче значення – внутрішні перенапруги. Їх джерелом є електрорушійні сили генераторів енергосистеми, а причиною – нормальні чи аварійні комутації, які супроводжуються коливними процесами чи резонансними явищами.

Поряд з внутрішніми перенапругами на ізоляцію електроустановок діють грозіві перенапруги, причиною яких є удари блискавок в електроустановки. Блискавка в електричному відношенні є джерелом струму імпульсної форми. Максимальні значення струму блискавки можуть досягати значень 200 кА. Удари блискавок в лінії електропередач викликають в них перенапруги порядку (10 ... 15) МВ. Такі перенапруги ізоляція ЛЕП витримати не в змозі. Відбувається пробій повітря вздовж гірлянди ізоляторів, який переходить у підтримуваний напругою джерела дуговий розряд.

Ефективним способом ліквідації замикань на лініях (10–35) кВ є компенсація ємнісного струму у місці замикання за допомогою *дугозахисного реактора (дугозахисної котушки)*. Внаслідок компенсації струму і припинення поступлення енергії дуга в місці замикання не може підтримуватися і швидко гасне.

В установках 110 кВ та більше економічно доцільніше застосовувати глухе *заземлення нейтралі*. В цьому випадку коротке замикання на лінії ліквідується за допомогою пристроїв автоматичного повторного вмикання (АПВ). А саме: при виникненні короткого замикання лінія автоматично від'єднується від джерела живлення на час, необхідний для погасання дуги, після чого автоматично знову вмикається. Для істотного скорочення кількості аварійних від'єдань ЛЕП від джерел живлення додатково до АПВ використовують *блискавкозахисні троси*. Заземлені троси підвішуються на опорах вище проводів ЛЕП, внаслідок чого різко падає ймовірність прориву блискавок через захисну зону троса.

Поряд з порушеннями лінійної ізоляції ЛЕП удари блискавок зумовлюють виникнення на проводах імпульсів високої напруги, які, розповсюджуючись вздовж проводів, досягають підстанцій та діють на встановлене там обладнання.

Таким чином, на ізоляцію електроустановок діють:

- робоча напруга;
- імпульси внутрішніх комутаційних перенапруг;
- довготривале підвищення напруги після дугового замикання;
- імпульси грозових перенапруг.

Основною особливістю повітряної ізоляції є залежність її діелектричної

міцності від атмосферних умов: тиску, температури та вологості повітря. На електричну міцність ізоляторів, встановлених на відкритому повітрі (ізоляторів зовнішньої установки), істотно впливають також забруднення їх поверхні та опади.

Повітряні проміжки та ізолятори, електричні характеристики яких залежать від атмосферних умов, відносять до зовнішньої ізоляції електроустановок.

Електрична міцність внутрішньої ізоляції електрообладнання практично не піддана впливу атмосферних умов. Це ізоляція обмоток трансформаторів та електричних машин, ізоляція кабелів, герметизована ізоляція вводів та силових конденсаторів, ізоляція між контактами вимикачів у відімкненому стані та ін.

Внутрішня ізоляція представляє собою, як правило, комбінацію твердого та рідкого діелектриків (наприклад, у трансформаторах) або твердого та газоподібного діелектриків (наприклад, у кабелях). Застосовується також однокомпонентна ізоляція.

Особливістю внутрішньої ізоляції є її *старіння*, тобто погіршення електричних, механічних та ін. фізико-хімічних показників у процесі експлуатації. Надзвичайно важко уникнути виникнення в ізоляції *мікроскопічних* розрядів. Наприклад, внаслідок зміни температурного режиму, викликаного коливаннями струму навантаження, в комбінованій (рідинно-твердій) ізоляції утворюються газові бульбашки, в яких виникають *часткові розряди*. На гострих краях електродів, на деталях кріплення апаратури виникає *коронний розряд*. Під дією цих мікроскопічних розрядів ізоляція руйнується, хімічно розкладається, забруднюючись продуктами розкладу.

Внаслідок *діелектричних втрат* ізоляція нагрівається. При утрудненому тепловідводі, що є характерним для монолітної (твердої) ізоляції, потужний нагрів може спричинити тепловий пробій ізоляції. Тому, при проектуванні внутрішньої ізоляції необхідно враховувати можливість тепловідводу або спеціального охолодження.

Пробій твердої або комбінованої ізоляції – явище *незворотне*. Рідка та газова ізоляції самовідновлюються, однак пробіи погіршують їх характеристики.

Електрична міцність як внутрішньої, так і зовнішньої ізоляції залежить від форми (тривалості) діючої напруги: пробивна напруга ізоляції тим вища, чим менший час дії напруги. Таку ж залежність від часу мають і самі діючі напруги в електроенергетиці (робочі напруги – внутрішні перенапруги – грозові розряди): чим менший час дії, тим вони більші по абсолютній величині. При цьому виявлено, що залежність від часу величин діючих на ізоляцію напруг більш крута, ніж у пробивних напруг ізоляції (міцності ізоляції). А це означає, що якщо вибрати розміри ізоляції такими, щоб вони витримували всі можливі в експлуатації короточасні підвищення напруг, то по відношенню до робочої напруги ізоляція буде мати невиправдано великий запас електричної міцності.

Якщо ж орієнтуватися на доцільний запас міцності ізоляції при робочій напрузі, то ізоляція не буде витримувати перенапруг. Отже, для зменшення габаритів ізоляції, а відтак і вартості електрообладнання, необхідно *обмежувати перенапруги*.

Обмеження перенапруг в електричних установках відбувається за допомогою *захисної апаратури* (розрядників та ін. спеціальних заходів). Підвищення ефективності електрообладнання в значній мірі пов'язане з прогресом у розвитку захисної апаратури та удосконаленні її захисних характеристик.

Взаємне узгодження значень діючих напруг, характеристик захисної апаратури та електричних характеристик ізоляції, яке забезпечує надійну роботу та високу економічність електричних установок, називається координацією ізоляції та є одним із головних завдань їх проектування. При вирішенні питань координації ізоляції не завжди слід добиватися повної її неушкоджуваності. Доцільно прагнути лише до *малої ймовірності* появи ушкодження. Оптимальні умови захисту від перенапруг та координації ізоляції повинні вибиратися у результаті техніко-економічного розрахунку, тобто шляхом врахування різних видатків: на підсилення захисних пристроїв, які зменшують ймовірність аварії через пошкодження ізоляції; на ремонт пошкодженого обладнання та внаслідок недовідпуску електроенергії.

Таким чином, у відповідності з вище викладеним предметом курсу «Техніка високих напруг» є:

- електричні характеристики зовнішньої та внутрішньої ізоляції електроустановок;
- захист від внутрішніх та грозових перенапруг в електричних системах;
- координація та методи випробовувань ізоляції;
- ізоляційні конструкції різних видів електрообладнання, в тому числі ліній електропередач.

В3. Короткий історичний огляд розвитку техніки високих напруг

Перша лабораторія високих напруг на території бувшої Росії була створена у 1907 році в Електротехнічному інституті (м. Санкт-Петербург, зараз – Санкт-Петербурзький державний електротехнічний університет «ЛЭТИ» імені В. І. Ульянова (Леніна)). Лабораторія мала в наявності першокласне, на той час, обладнання, в тому числі два трансформатори потужністю по 10 $kV \cdot A$ із змінним коефіцієнтом трансформації. Кожний із трансформаторів міг забезпечити напругу від 20 до 100 kV .

В 1910 році В.Ф. Міткевич висунув й обґрунтував ідею розщеплення проводів фаз, яка на багато років випередила потреби електротехніки того часу. Його дослідження дозволили зробити основоположний висновок про доцільність

розщеплення проводів високовольтної лінії для обмеження інтенсивності коронного розряду. Цей фундаментальний висновок, покладений в основу робіт по створенню ЛЕП надвисокої напруги, був реалізований лише через півстоліття, коли в 1956 році, набагато раніше, ніж в інших країнах, в СРСР була побудована перша промислова ЛЕП з розщепленими проводами.

Через 4 роки В.К. Аркадьєв та тоді ще студент Н.В. Баклін винайшли генератор імпульсних напруг («генератор блискавок», що базувався на запропонованому Аркадьєвим принципі автоматичного іскрового перемикавання конденсаторів), який став невід’ємним атрибутом лабораторій високих напруг.

В 1912 – 1913 рр. на VI та VII з’їздах електротехніків були вперше викладені результати досліджень з техніки високих напруг: ізоляторів, довгих ліній, вимірювальної техніки. Доповідали професори М.А. Шателен, О.О. Горєв та А.А. Чернишев.

В 30-х роках минулого століття були започатковані основи важливих для електроенергетики наукових напрямків: з теорії перенапруг в електричних системах (Л.І. Сіротінській), вентильних розрядників (Л.І. Іванов), блискавкозахисту (А.А. Акоюн), захисту електрообладнання від грозових імпульсів (А.Ф. Богомолів). Значний вклад у розвиток уявлень про фізику розрядів у довгих повітряних проміжках та рідинах вніс професор В.С. Комельков.

В лабораторії високих напруг Ленінградського політехнічного інституту (нині – Федеральна державна бюджетна освітня установа вищої професійної освіти «Санкт-Петербурзький державний політехнічний університет») під керівництвом проф. А.А. Горєва та А.М. Залесского був розгорнений широкий комплекс робіт з дослідження електричних характеристик ізоляції ліній електропередач, характеристик коронного розряду на проводах повітряних ліній.

У високовольтній лабораторії «ЛЭТИ» під керівництвом професора А.А. Смурова на унікальному обладнанні, яке включало комплекс високовольтних трансформаторів на напруги 350 та 375 кВ досліджувались грозові перенапруги в ЛЕП, їх захист за допомогою трубчастих розрядників, процеси старіння в діелектриках, питання електробезпеки.

Природу діелектричних втрат, електропровідності діелектриків при значних напруженостях електричного поля, теорію пробою діелектриків досліджували І.В. Курчатов, А.П. Александров, Н.Н. Семьонов, В.А. Фок.

У 1940 році утворився новий центр техніки високих напруг – Харківський електротехнічний інститут (тепер – «ХПІ»). Там були проведені дослідницькі роботи щодо імпульсних характеристик заземлювачів, розповсюдження електромагнітних хвиль у ЛЕП та захисту підстанцій від грозових перенапруг (А.К. Потужний, С.Ф. Фертик). Був побудований генератор імпульсних напруг на найбільшу на той час напругу – 8,3 МВ. Навіть виходячи з сьогоденних мірок це була одна з найбільших установок такого типу.

50 – 60-ті роки минулого століття були ознаменовані подальшими розробками унікальних дослідницьких установок на надвисокі енергетичні показники, а також створенням перших у світі ЛЕП напругою 500 кВ.

У 1980 році Державної премії за створення та впровадження лінії електропередач надвисокої напруги 750 кВ була удостоєна група спеціалістів, в

тому числі проф. В.П. Фотін, Н.Н. Тіходєєв, С.Д. Лізунов та ін.

В4. Історичні особи техніки високих напруг

В.Ф. Міткевич [1872 – 1951] – видатний російський і радянський вчений-електротехнік, винахідник, громадський діяч; під керівництвом професора В.Ф. Міткевича в 1907 році в південно-східному крилі Головного корпусу Електротехнічного інституту (зараз – «ЛЭТИ») була створена високовольтна лабораторія, а на території інституту була споруджена перша в світі дослідницька повітряна лінія електропередачі з розщепленими проводами; брав участь в розробці та реалізації державного плану 1920 року з електрифікації Росії (знаменитий план «ГОЭЛРО»); автор відомих у науковому світі підручників «Магнетизм и электричество» (1912 р.) та «Физические основы электротехники» (1927 р.), а також популярного збірника своїх виступів за період з 1931 до 1938 рр. «Основные физические воззрения»; з 1927 р. член-кореспондент, а з 1929 р. дійсний член АН СРСР; ініціатор і фундатор Відділу технічних наук АН СРСР, який очолив у 1935 році; лауреат Державних премій СРСР за 1929 р. та 1943 р.; переконаний прихильник класичних поглядів на фізичну природу в дусі Фарадея й Максвелла; полум'яний борець з формально-спекулятивним підходом, який у 30-і роки минулого століття особливо активно став проникати в наукові заклади.

В.К. Аркадьєв [1884 – 1953] – російський і радянський вчений-електротехнік, член-кореспондент АН СРСР (1927 р.); автор фундаментальних праць з магнітодинаміки; першим спостерігав у 1913 році феромагнітний резонанс.

М.А. Шателен [1866 – 1957] – перший професор електротехніки, фундатор електротехнічної освіти в Росії, активний учасник електрифікації країни; член кореспондент АН СРСР з 1931 року; заслужений діяч науки й техніки СРСР; у 1922 році з його ініціативи відновився вихід журналу «Электричество»; наступного року, беручи участь в Міжнародній конференції з мереж високої напруги, був вибраний її віце-президентом; у 1926 році був вибраний членом ради Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК); з 1933 року – заступник голови комітету з участі СРСР в міжнародних енергетичних об'єднаннях; в період з 1928 до 1934 року разом з професорами В.Ф. Міткевичем та В.А. Толвінським виконав роботу щодо підбірки матеріалів, редагування та видання багатотомної «Справочной книги для электротехников»; у 1931 році брав участь в організації Енергетичного інституту АН СРСР та Музею з енергетики при ньому.

О.О. Горєв [4(16).05.1884 – 15.04.1953] – видатний російський і радянський вчений - електротехнік. Після закінчення в 1907 році Петербурзького політехнічного інституту був залишений там для педагогічної та наукової роботи (з 1919 року - професор). Брав участь у розробці плану ГОЕЛРО, а також у проектуванні ряду електротехнічних споруд. Працював головою «Электроплана Главэлектро», був членом «Госплана»; з 1933 року був консультантом «Средволгостроя», а потім «Гидроэнергопроекта». Основні праці О.О. Горєва присвячені техніці високих напруг і передачі електроенергії. У теорії передачі електричної енергії змінним струмом дав оригінальний і простий метод електричного розрахунку ліній електропередачі. Його основні праці: «К вопросу об изоляции линий высокого напряжения» (М., 1922); «Высоковольтные линии передачи электрической энергии. (Электрический расчет)» (Л., 1927); «Введение в теорию устойчивости параллельной работы электрических станций» (ч. 1, Л., 1935); «Импульсные характеристики больших искровых промежутков» (доповідь разом з А.М. Залєсським та Б.М. Рябовим; М., 1948); «Переходные процессы синхронной машины» (Л.—М., 1950). 1940 року у зв'язку з проектуванням лінії електропередачі напругою до 400 кВ під керівництвом О.О. Горєва були визначені характеристики іскрових проміжків довжиною до 4,5 м, проведені дослідженнями щодо створення потужних імпульсних генераторів високих напруг. Під його керівництвом була

створена оригінальна установка потужністю 300 МВ для випробування високовольних апаратів (Державна премія 1948 року). Праці вченого із стійкості роботи електричної системи (найважливішого питання в проблемі збільшення дальності і потужності передачі електричної енергії змінним струмом) привели до встановлення загального критерію («критерій Горєва») стійкості спільної роботи генераторів електричної станції при будь-якому їх числі і в будь-яких режимах роботи. В останні роки під керівництвом О.О. Горєва були виконані роботи з подовжньої компенсації, стійкості, внутрішніх перенапруг, грозозахисту підстанцій.

О.О. Чернишев [9(21).08.1882, м. Ловень, нині Чернігівської області – 18.04.1940, Москва] – російський і радянський учений-електротехнік, академік АН СРСР з 1932 року. Закінчив Петербурзький політехнічний інститут (1907 рік); там же отримав звання професора (1919 рік); з 1918 року працював у Фізико-технічному інституті в Петрограді, а пізніше – у ряді установ АН СРСР (Енергетичному інституті, Комісії з автоматики і телемеханіки та ін.) аж до переїзду у 1936 році до Москви. Основні праці – з питань техніки високої напруги й радіотехніки. О.О. Чернишев займався також проблемами електричних вимірів, телебачення, дальності радіотелефонного зв'язку, електрифікації залізниць, плануванням і організацією наукових робіт, історією електротехніки та ін. Основні праці: «Абсолютные измерения в высоковольтных цепях» (1913); «Фотоэлементы» («Вестник рентгенологии и радиологии. Отдел физико-технический» (т.1, 1919)); «Токи высокого постоянного напряжения» (там же, 1922); «Устройство для защиты от перенапряжений» (там же, 1929). Брав участь в розробці плану ГОЕЛРО; лауреат Державної премії СРСР (1930 рік).

О.А. Смуров [3(15).01.1884, м. Санкт-Петербург – 8.04.1937, м. Ленінград] – радянський електротехнік, заслужений діяч науки і техніки РРФСР (1937 р.); закінчив Петербурзький університет (1906 р.) і Петербурзький електротехнічний інститут (1911 р.), з 1919 року – професор Петроградського (Ленінградського) електротехнічного інституту («ЛЭТИ»), в 1925 – 29 рр. - його ректор; О.А. Смуров розпочав свою діяльність як автор ряду розробок в області електрифікованого транспорту, потім його інтереси зосередилися на техніці високих напруг: у 1919 році була оновлена лабораторія ТВН (приміщення високовольної лабораторії було організовано шляхом переkritтя внутрішнього двору інституту; лабораторія, обладнана унікальними установками, справила величезний вплив на розвиток радянської енергетики, формування норм проектування ліній електропередач); кафедра ТВН і лабораторія, що носить зараз ім'я О.А. Смурова, стали базою для розвитку наукових напрямів, пов'язаних з електрофізикою і схемами джерел живлення імпульсної і безперервної дії; учнями вченого були професори К.С. Архангельській, Г.Г. Третьяк, Л.Є. Машкіллейсон, що мають великі заслуги в справі створення потужних ліній електропередач; у 1935 – 37 рр. професор О.А. Смуров залучає в свою лабораторію таких вчених як О.О. Горєв, А.А. Вульф, Н.Н. Щедрін, А.М. Залескій і спільно з ними вирішує питання релейного захисту та стійкості паралельної роботи синхронних генераторів; в лабораторії ТВН працювали майбутні доктори наук Н.П. Богородіцькій, В.І. Іванов, Ю.Я. Юров, В.В. Пасинков (їх праці, розпочаті в лабораторії О.А. Смурова, лягли в основу багатьох цікавих робіт і напрямків в інституті); на жаль, рання смерть О.А.Смурова (1937 р.!) позбавила кафедру і лабораторію талановитого керівника; основний вклад в науку вчений вніс у галузі техніки високих напруг, передачі електричної енергії на відстань, зокрема в теорію стійкості електричних систем і теорію пробою діелектриків; створив ряд нових приладів для вимірювань на високих напругах; дав пояснення механізму електричного пробою в газах, рідинах і твердих діелектриках, що дозволило удосконалити конструкції електричних апаратів і підвищити їх надійність; основна наукова праця – «Электротехника высокого напряжения и передача энергии» (т. 1–3, М. – Л., 1932—35 рр.); значний внесок вченого у розробку проблем електробезпеки: досліджував заземлюючі пристрої, визначав небезпечний вплив ліній електропередачі на проведення зв'язку, вишукував найвигідніші з точки зору безпеки режими нейтралі, створював надійні розподільні пристрої (спільно з ним ці дослідження вели С.А. Хаєцькій, Н.Н. Белянін, К.С. Архангельській та ін.); найбільш повно названі роботи були відображені в монографії з

трьох частин вченого з електробезпеки, однієї з перших у світовій літературі, написаних на цю тему: - «Небезпека струмів високої напруги для життя», - «Небезпека від струмів високої напруги на лініях передачі енергії і заходи захисту від цієї небезпеки при експлуатації та ремонті ліній», - «Вплив ліній електропередачі на сусідні установки слабого струму»; О.А. Смурову вперше вдалося встановити нелінійність електричного опору тіла людини - найважливішу характеристику, використовувану при визначенні уражувальних значень напруг і струмів.

Підсумок

На ізоляцію електроустановок діють: робоча напруга; імпульси внутрішніх комутаційних перенапруг; довготривале підвищення напруги після дугового замикання; імпульси грозових перенапруг.

Ізоляція електроустановок поділяється на зовнішню і внутрішню. Особливістю внутрішньої ізоляції є її старіння.

Головним завданням при проектуванні ізоляційних конструкцій електроустановок є їх координація.

Запитання

Які проблеми виникають перед ТВН з ростом класу напруг та потужностей, які передаються ЛЕП?

Що таке найбільша робоча напруга, перенапруга ?

Як визначити величину довготривалої робочої напруги, яку витримує ізоляція ?

Які види перенапруг, діючих на ізоляцію; вкажіть їх джерело та дайте короткі характеристики?

Який вплив мають способи заземлення нейтралі електромережі на кратність перенапруг?

РОЗДІЛ І ЕЛЕКТРИЧНІ ПОЛЯ У ВИСОКОВОЛЬТНИХ УСТАНОВКАХ

Лекція 2

[2, с. 21–33; с. 42–43; 6, с. 40–55; 9, с. 17–33, с. 43–48]

1.1 Основні закони електричного поля

Електричне поле, як і магнітне поле, є складовою частиною єдиного, реально існуючого електромагнітного поля, яке представляє собою вид матерії. Електричне і магнітне поля, як правило, розглядають окремо, що полегшує вивчення властивостей кожного з цих полів.

Проявлення електричного поля спостерігається у вигляді механічних сил, діючих на електричні заряди. Інтенсивність електричного поля характеризується його напруженістю \vec{E} – вектором, який направлений вздовж механічної сили поля \vec{F} , діючої на *позитивний* електричний заряд. Чисельне значення напруженості E визначається тією механічною силою, яка діє в електричному полі на *одиничний позитивний* електричний заряд у даній точці поля.

Отже, зв'язок між механічною силою поля \vec{F} , його напруженістю \vec{E} та зарядом e^+ визначається виразом

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{e^+}, \left[\frac{H}{Kл} \right]. \quad (1.1)$$

Розглянемо поле точкового електричного заряду q у пустоті. Дослідження показують, що напруженість цього поля змінюється зворотно пропорційно до квадрата радіуса сферичної поверхні r , описаної навколо точкового заряду:

$$E = \frac{q}{\varepsilon_0 \cdot 4\pi \cdot r^2}, \quad (1.2)$$

де $\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9} \cdot 10^{-9} \left[\frac{A^2 \cdot c^2}{H \cdot m^2} \right] = 8,85 \cdot 10^{-12} \left[\frac{\Phi}{m} \right]$ – електрична постійна.

Якщо точковий заряд q буде розташований не в пустоті, а в однорідному, з однаковими в усіх напрямках властивостями, середовищі (наприклад, у діелектрику), то напруженість електричного поля визначиться згідно виразу

$$E = \frac{q}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot 4\pi \cdot r^2}, \quad (1.3)$$

де $\varepsilon \cdot \varepsilon_0$ – абсолютна діелектрична проникність середовища;

ε – діелектрична проникність середовища.

Так як діелектрична проникність ε для пустоти (практично для повітря) рівна 1, а для будь-якого іншого діелектрика $\varepsilon \geq 1$, то, згідно (1.3), при $q = const$ напруженість поля E в діелектрику буде меншою, ніж у повітрі, в ε разів. У

двох послідовно розміщених діелектриках напруженість поля менша у тому діелектрику, який має діелектричну проникність ε більшої величини.

Послаблення електричного поля в діелектрику пояснюється явищем *поляризації*, яке проявляється у тому, що під дією зовнішнього електричного поля зв'язані заряди атомів і молекул діелектрика зміщуються: позитивні – вздовж напрямку поля, негативні – у протилежному напрямку. Поле зміщених зарядів у діелектрику протилежне зовнішньому полю, а тому його послаблює.

Діелектричні проникності деяких полімерних матеріалів, що використовуються у високовольтній техніці, подані у табл.1.1.

Таблиця 1.1 Діелектричні проникності полімерних матеріалів

Полімер	Діелектрична проникність	Область використання
Поліетилен	2,1 – 2,3	Оболонки кабелів
Полівінілхлоридний пластикат	3,5 – 5,0	
Поліетилентерефталат	3,2 – 3,5	Плівкова ізоляція трансформаторів, конденсаторів
Фторопласт	1,9 – 2,4	
Поліметилметакрилат	2,8 – 3,5	Елементи конструкцій
Поліамід	2,4 – 3,0	

Оскільки електричне поле володіє *енергією*, його можна охарактеризувати потенціалом φ . Потенціал φ визначається як запас потенціальної енергії, яким володів би *одиничний заряд* у визначеній точці електричного поля заряду q . Ця енергія відповідає роботі, яку необхідно затратити, щоб одиничний заряд перемістити з даної точки простору у нескінченно віддалену, де потенціал поля приймається рівним нулю.

Для переміщення *одиничного* заряду у полі точкового заряду q на елементарному шляху dx необхідно затратити роботу $dA = E \cdot dx$. Так як напруженість електричного поля точкового заряду по мірі віддалення від нього змінюється, то для визначення величини роботи переносу одиничного заряду з даної точки $x = r$ у нескінченність $x \rightarrow \infty$ необхідно застосувати інтегрування:

$$A = \int_r^{\infty} E(x) dx.$$

Для розглядуваного випадку $E(x) = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0 \cdot 4\pi \cdot x^2}$, а тому

$$A = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0 \cdot 4\pi} \int_r^{\infty} \frac{dx}{x^2} = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0 \cdot 4\pi} \left(-\frac{1}{x} \Big|_r^{\infty} \right) = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0 \cdot 4\pi \cdot r}. \quad (1.4)$$

Ця робота відповідає потенціалу φ поля точкового заряду q на відстані r від нього.

Визначимо зв'язок між величиною напруженості електричного поля E та потенціалом φ (запасом потенціальної енергії одиничного заряду). Зміна потенціалу $d\varphi$ в електричному полі на елементарному нескінченно малому відрізку dx описується співвідношенням $d\varphi = -dA = -E \cdot dx$ або

$$E = -\frac{d\varphi}{dx} \left[\frac{B}{m}; \frac{\kappa B}{m} \right], \quad (1.5)$$

де $\frac{d\varphi}{dx}$ – швидкість зміни потенціалу вздовж електричного поля;

знак *мінус* показує, що вектор напруженості електричного поля направлений у бік *зменшення* його потенціалу.

Величину

$$\frac{d\varphi}{dx} = \text{grad}\varphi = -E. \quad (1.6)$$

називають *градієнтом потенціалу* електричного поля, чисельне значення якого визначає швидкість *наростання* потенціалу вздовж напрямку поля.

Різницю потенціалів, наприклад, між двома точками у полі точкового заряду q , які знаходяться на віддалі r_1 та r_2 від нього, можна знайти з (1.4):

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0 \cdot 4\pi} \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (1.7)$$

При цьому, в однорідному електричному полі $E = \frac{U}{x}$, де U – різниця потенціалів, а x – відстань між розглядуваними точками електричного поля.

Слід відзначити, що складне електричне поле, створене декількома зарядами, простіше досліджувати, визначаючи потенціали, а не напруженості поля. Справді, у першому випадку потенціал точки електричного поля знаходиться алгебраїчним сумуванням потенціалів полів окремих зарядів; у другому випадку доводиться застосовувати геометричне складання векторів напруженостей цих полів.

Часто замість вектора напруженості електричного поля \vec{E} вводять вектор електричного зміщення \vec{D} :

$$\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0 \cdot \vec{E}, \quad (1.8)$$

причому розмірність величини \vec{D} наступна:

$$\dim \vec{D} = \left[\vec{D} \right] = [\varepsilon] \cdot [\varepsilon_0] \cdot \left[\vec{E} \right] = \frac{\Phi}{m} \cdot \frac{B}{m} = \frac{A^2 \cdot c^2}{H \cdot m^2} \cdot \frac{H}{Kл} = \frac{Kл^2}{H \cdot m^2} \cdot \frac{H}{Kл} = \frac{Kл}{m^2}.$$

Чисельно величина *електричного зміщення* D рівна заряду величиною 1 Кл , наведеному на металічну поверхню площею 1 м^2 , внесена *перпендикулярно* до електричного поля у визначену точку. Так, біля електродів ця величина рівна густині заряду σ на електродах.

Якщо оточити заряд q замкненою поверхнею S , то потік електричного зміщення N , який пронизує цю поверхню, буде чисельно рівний заряду q . Справді, оточимо для спрощення викладок заряд q сферичною поверхнею радіуса r . Потік N електричного зміщення D через цю поверхню буде рівний

$$N = D \cdot S = \varepsilon \varepsilon_0 \cdot E \cdot S = \varepsilon \varepsilon_0 \cdot \frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0 \cdot 4\pi \cdot r^2} \cdot 4\pi \cdot r^2 = q. \quad (1.9)$$

Вираз $N = D \cdot S = q$ – математичний вираз *електростатичної теореми Гауса* (Johann Carl Friedrich Gauß (30.04.1777 – 23.02.1855), мав прижиттєвий титул «короля математики»).

Як бачимо з (1.9), величина електричного зміщення D не залежить від діелектричної проникності середовища. Вона залишається *незмінною* при переході з одного середовища (ε_1) в інше (ε_2). На противагу цьому, напруженості електричних полів у середовищах змінюються зворотно пропорційно до їх діелектричних проникностей:

$$D = \varepsilon \varepsilon_0 \cdot E_1 = \varepsilon \varepsilon_0 \cdot E_2; \quad \boxed{\frac{E_1}{E_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}}. \quad (1.10)$$

1.2 Зображення електричних полів

Електричне поле прийнято зображувати на площині силовими та еквіпотенціальними лініями. Силовими лініями називаються такі уявні лінії електричного поля, напрям яких у будь-якій точці співпадає з напрямом вектора напруженості електричного поля. Еквіпотенціальними лініями називаються такі уявні лінії електричного поля, потенціали кожної точки яких однакові.

Вздовж еквіпотенціальних ліній електричне поле роботи не здійснює, а тому вектор напруженості електричного поля \vec{E} , відповідно, силова лінія перпендикулярні у будь-якій точці еквіпотенціальним лініям. Справді, якщо \vec{dx} – вектор напрямку руху вздовж еквіпотенціальної лінії електричного поля, то $d\varphi = -\left|\vec{E}\right| \cdot \left|\vec{dx}\right| \cdot \cos\left(\vec{E} \vee \vec{dx}\right) = 0; \Rightarrow \vec{E} \perp \vec{dx}$.

Чим більше силових ліній припадає на одиницю поверхні, тим інтенсивніше, сильніше поле. Величина напруженості електричного поля якісно може характеризуватися густиною (щільністю) силових ліній.

В залежності від *конфігурації* електричні поля поділяють на однорідні і неоднорідні, симетричні і несиметричні. В однорідному полі напруженість у всіх точках однакова. В симетричних полях поле однакове тільки біля кожного з електродів.

Нехай точковий заряд q буде розміщений у центрі повітряної бульбашки з діелектричною проникністю $\varepsilon_1 = 1$, яка знаходиться у рідині з $\varepsilon_2 = 3$. Конфігурації електричних полів подані на рис. 1.1.

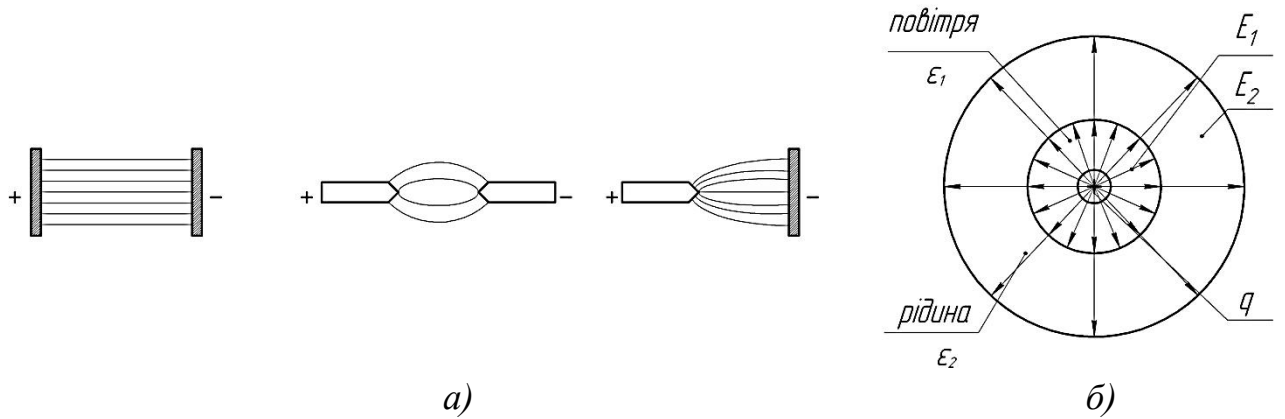


Рис. 1.1 Електричні поля різних конфігурацій:

- а) однорідне, неоднорідне і симетричне, неоднорідне і несиметричне, відповідно;
 б) заряду у сферичній повітряній бульбашці й рідині

Так як густина силових ліній пропорційна напруженості електричного поля, то на границі *повітря – рідина* частина силових ліній переривається (див. (1.10)) внаслідок зменшення напруженості електричного поля в 3 рази. На границі двох діелектриків утворюється уявний зв'язаний заряд зміщення другого діелектрика, який є джерелом електричного поля у ньому.

Якщо при побудові ліній електричного поля прийняти, що число силових ліній пропорційне не напруженості поля, а електричному зміщенню, можна використати властивість незмінності вектора електричного зміщення при переході від одного середовища до іншого – електричне поле буде зображуватися неперервними лініями.

Розглянемо випадок *двох середовищ* з різними діелектричними проникностями, наприклад, $\epsilon_2 \geq \epsilon_1$. Якщо поверхня, що поділяє, не є еквіпотенціальною, то силові лінії електричного поля зазнають заломлення як показано на рис. 1.2.

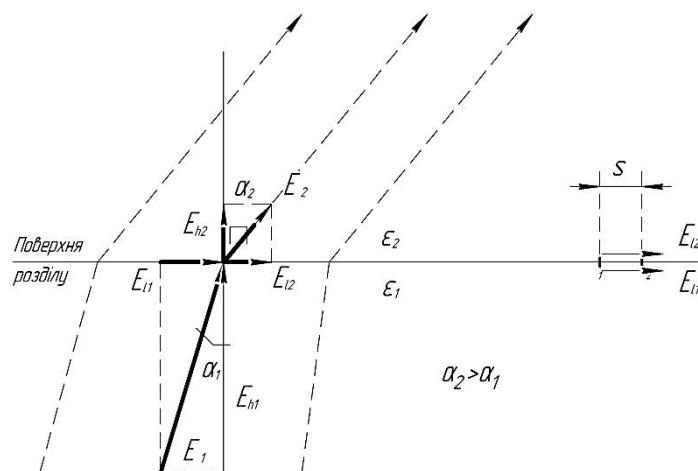


Рис. 1.2 Заломлення силових ліній на поверхні розділу двох середовищ

Вектор напруженості електричного поля \vec{E}_1 у першому середовищі

розкладемо на дві складові: *нормальну* \vec{E}_{h_1} й *тангенціальну* \vec{E}_{l_1} до поверхні розділу. В другому середовищі вектор напруженості позначимо через \vec{E}_2 , а відповідні складові – через \vec{E}_{h_2} та \vec{E}_{l_2} .

Виразимо різницю потенціалів між двома близькими точками 1 і 2 вздовж поверхні розділу з відстанню S між ними через відповідні тангенціальні складові (див. рис. 1.2): $U_{12} = E_{l_1} \cdot s = E_{l_2} \cdot s$. Після скорочення на S матимемо: $E_{l_1} = E_{l_2}$, тобто тангенціальні складові напруженості поля на поверхні розділу залишаються незмінними. Нормальна складова напруженості у другому шарі діелектрика згідно (1.10) зміниться в $\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$ разів і буде рівною $E_{h_2} = E_{h_1} \cdot \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$. Тоді, напруженість поля у другому середовищі \vec{E}_2 по величині і по напрямку визначиться діагоналлю паралелограма, побудованого на складових \vec{E}_{h_2} та \vec{E}_{l_2} . Як бачимо, кут нахилу $\alpha_2 \geq \alpha_1$, оскільки діелектрична проникність $\epsilon_2 \geq \epsilon_1$. Відхилення відбулось за рахунок зменшення нормальної складової, що зумовлено більшою *поляризацією* у другому середовищі.

Для першого і другого середовищ з рисунка знаходимо:

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{\vec{E}_{l_1}}{\vec{E}_{h_1}}; \quad \operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{\vec{E}_{l_2}}{\vec{E}_{h_2}},$$

або

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\vec{E}_{h_2}}{\vec{E}_{h_1}} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}. \quad (1.11)$$

1.3 Ефективність роботи ізоляційних конструкцій в електричному полі

Всі речовини в залежності від характеру їх поведінки в електричному полі поділяються на три основні групи: провідники, діелектрики та напівпровідники.

Провідники (метали та їх сплави, електроліти) мають велику кількість вільних електронів і володіють високою електропровідністю: їх питомий опір складає ($10^{-8} - 10^{-5}$) Ом·м.

Діелектрики або непровідники (гази, оливи, дерево, папір, фарфор, полімери та ін.), не маючи вільних електронів, практично не проводять струму та відносяться до ізоляційних речовин, що володіють питомим опором ($10^6 - 10^{16}$) Ом·м. В діелектриках електричне поле, створене зовнішніми зарядами, після їх усунення може існувати тривалий час, тоді як всередині провідників - зникає майже миттєво.

Напівпровідники (германій, кремній, карбід кремнію, селен, арсенід галію та ін.) з електропровідності займають проміжне становище між провідниками та діелектриками через невелику кількість вільних електронів провідності. Основою їх провідності є валентні електрони атомів, які під дією зовнішніх факторів отримують додаткову енергію відриву від атомів. Питомий опір напівпровідників складає інтервал ($10^{-4} - 10^{10}$) Ом·м.

Чим однорідніше електричне поле, тим краще використовується діелектрик. Коефіцієнт використання $k_{\epsilon} = \frac{E_{\min}}{E_{\max}}$ діелектрика визначається відношенням найменшої та найбільшої напруженостей полів у даній конструкції. Наприклад, у коаксиальних циліндрах з одним діелектриком цей коефіцієнт визначиться відношенням напруженості поля біля зовнішнього циліндра радіуса R до напруженості поля біля внутрішнього циліндра радіуса r та буде рівним відношенню радіусів цих циліндрів r/R .

Слід відзначити, що в конденсаторах з шаровою ізоляцією при невеликому співвідношенні діелектричних проникностей та товщин шарів діелектриків напруженість електричного поля в одному з шарів може перевищити його міцність і він буде пробитий. Тоді вся напруга виявиться прикладеною до шарів, що залишилися і напруженості полів у них збільшаться.

Гранична величина напруженості електричного поля E_{np} , при якій настає пробій діелектрика, визначає його електричну міцність.

Відношення пробивної напруженості E_{np} до величини максимальної напруженості поля E_M при робочій напрузі називають коефіцієнтом надійності ізоляції $k_n = \frac{E_{np}}{E_M} \geq 1$.

Для отримання більш однорідного поля в циліндричному конденсаторі з шаровою ізоляцією необхідно шари з більшими діелектричними проникностями розміщувати ближче до внутрішнього електрода. В цьому випадку ізоляція конденсатора буде використовуватись більш ефективно.

Підсумок

Інтенсивність електричного поля характеризується його напруженістю, яка змінюється зворотно пропорційно до квадрата радіуса сферичної поверхні, описаної навколо точкового заряду.

Напруженість електричного поля в діелектрику буде меншою, ніж у повітрі, у стільки ж разів, у скільки більша діелектрична проникність середовища.

Потенціал електричного поля визначається запасом потенціальної енергії, яким володів би одиничний заряд у визначеній точці електричного поля деякого заряду. Ця енергія відповідає роботі, яку необхідно затратити, щоб одиничний заряд перемістити з даної точки простору у нескінченно віддалену, де потенціал

поля приймається рівним нулю.

Градiєнт потенціалу електричного поля визначає швидкість наростання потенціалу вздовж напрямку поля.

Величина електричного зміщення не залежить від діелектричної проникності середовища; вона залишається незмінною при переході з одного середовища в інше.

Напруженості електричних полів у середовищах змінюються зворотно пропорційно до їх діелектричних проникностей.

Електричне поле на площині зображується силовими та екіпотенціальними лініями. Вздовж екіпотенціальних ліній електричне поле роботи не здійснює.

В залежності від конфігурації електричні поля поділяють на однорідні і неоднорідні, симетричні і несиметричні.

Ефективність ізоляційної конструкції можна охарактеризувати коефіцієнтом використання діелектрика, коефіцієнтом надійності ізоляції та її електричною міцністю.

Запитання

Яким чином проявляється дія електричного поля та дайте визначення його напруженості?

Як залежить напруженість електричного поля від властивостей середовища?

Який фізичний зміст явища поляризації?

Який енергетичний зміст закладений у поняття «потенціал електричного поля»?

На що вказує градiєнт потенціалу електричного поля?

Дайте визначення електростатичної теореми Гауса?

Чи має значення величина діелектричної проникності середовища, яке пронизує електричне поле, при визначенні векторів електричного зміщення та напруженості електричного поля?

Як зображується електричне поле на площині та дайте відповідні визначення?

Чому вздовж екіпотенціальних ліній електричне поле не здійснює роботу?

Яким чином змінюється електричне поле, що пронизує два суміжні діелектрики з різними діелектричними проникностями, та дайте відповідні пояснення?

Якими показниками характеризують ефективність функціонування ізоляційної конструкції?

Лекція 3

[2, с. 40–42, 6, с. 40–55; 9, с. 41–43]

1.4 Електричне поле стандартних електродів

1.4.1 Електроди типу «стержень-стержень» та «стержень-площина»

Серед різноманітних форм електродів особливе місце в техніці високих напруг займають пари електродів «стержень-стержень» та «стержень-площина». Електричне поле цих електродів характеризується найбільшим ступенем нерівномірності, внаслідок чого вони широко використовуються для вивчення розряду у *різко нерівномірних* полях.

Ескіз електричного поля цих проміжків поданий на рис 1.3. Поле в проміжку «стержень-стержень» отримано з проміжку «стержень-площина» на основі принципу *дзеркального відображення*.

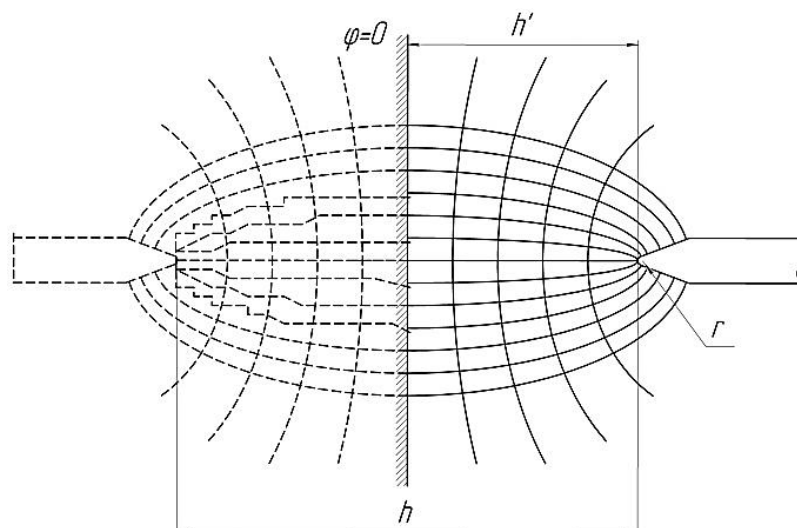


Рис.1.3 Електричне поле системи «стержень–площина»

Для аналітичного вивчення поля стержнів їх поверхня описується рівнянням двопорожнистого гіперболоїда обертання. Тоді при напрузі між стержнями U , відстані між ними h та радіусі кривизни їх кінчиків r ($d \gg r$) максимальну напруженість електричного поля на кінчику стержня для системи «стержень-стержень» можна знайти з виразу:

$$E_{\text{макс}} = \frac{2U}{\ln \frac{2h}{r}} \cdot \frac{1}{r}. \quad (1.12)$$

Виходячи з принципу дзеркального відображення, електричне поле в проміжку «стержень-площина» співпадає з полем проміжку «стержень-стержень», якщо останній має подвійну відстань між електродами ($h = 2h'$), до яких прикладена подвійна напруга. В такому разі, виходячи з виразу (1.12) для системи «стержень–площина» матимемо:

$$E'_{\text{макс}} = \frac{4U}{\ln \frac{4h}{r}} \cdot \frac{1}{r}. \quad (1.13)$$

Часто з практичних міркувань використовують вираз, що пов'язує напруженість електричного поля $E'(x)$ при зміні відстані між площиною та стержнем діаметром d на величину x :

$$E'(x) = -\frac{U \cdot h'}{(h'^2 - c^2) \cdot \text{arcth}\left(\frac{d}{d+r}\right)}. \quad (1.14)$$

Порівнюючи вирази (1.12) та (1.13), можна переконатись, що напруженість поля поблизу стержня у проміжку «стержень-площина» *майже удвічі* перевищує напруженість поля у проміжку «стержень-стержень».

Фізично це пояснюється тим, що *ємність* між стержнем та площиною майже вдвічі перевищує ємність між стержнями при одній і тій же відстані h між ними, що зумовлює, відповідно, наявність більшого заряду та напруженості поля біля стержня у проміжку «стержень-площина».

Радіус кривизни r кінця стержня дуже малий; відповідно, розрахункове значення $E'_{\text{макс}}$ може виявитися надто великим. В дійсності ж, величина напруженості електричного поля є обмеженою внаслідок явища *іонізації*. Іонізований простір високої провідності ніби продовжує електрод, але вже з більшим радіусом кривизни r' .

Зазвичай, один з електродів проміжку «стержень-стержень» *заземлений*. Само по собі надання нульового потенціалу одному з електродів *не змінює напруженості* поля у проміжку. Але, при цьому, поле спотворюється внаслідок впливу сторонніх заземлених предметів, наприклад, самої землі. Характер цього спотворення показаний на рис. 1.4, з якого витікає, що максимальне число силових ліній виходить із стержня, який знаходиться навпроти заземленого електроду.

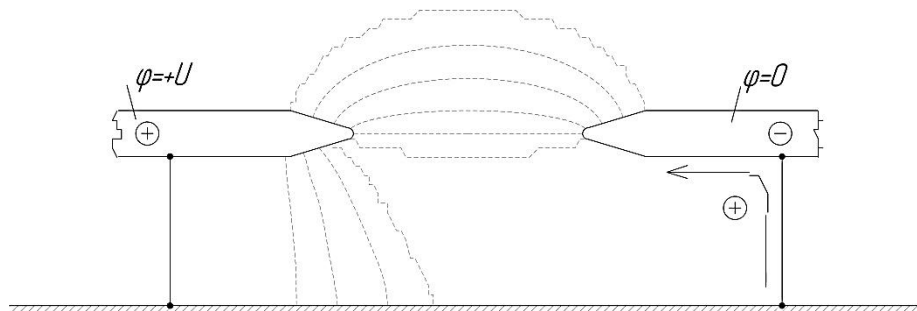


Рис. 1.4 Спотворення електричного поля стержневого проміжку

Це означає, що заземлення одного з електродів *збільшує* напруженість поля незаземлених електродів внаслідок дії сторонніх заземлених предметів. Зрозуміло, що ефект збільшення напруженості поля тим менший, чим далі від проміжку розміщені ці предмети.

1.4.2 Електроди типу «куля-куля»

Дві металічні кулі однакового діаметра широко використовуються в техніці високих напруг для вимірювань. Підбором куль різного діаметра можна проводити заміри у великому діапазоні напруг постійного і змінного струмів (промислової та високої частоти), а також імпульсні напруги тривалістю до декількох мікросекунд.

При дослідженні електричного поля двох куль встановлюють зв'язок між максимальною напруженістю $E_{\text{макс}}$, напругою U на кулях та відстанню a між ними. Найбільша напруженість електричного поля виникає на поверхнях шарів, повернутих одна до іншої, в точках на лінії, яка з'єднує центри куль. Ця залежність має наступний функціональний вигляд:

$$E_{\text{макс}} = \frac{U}{a} \cdot f\left(\frac{a}{r}\right), \quad (1.15)$$

де $f\left(\frac{a}{r}\right)$ – коефіцієнт неоднорідності електричного поля – функція відношення найменшої відстані a між поверхнями куль до величини радіуса r куль (див. рис. 1.5).

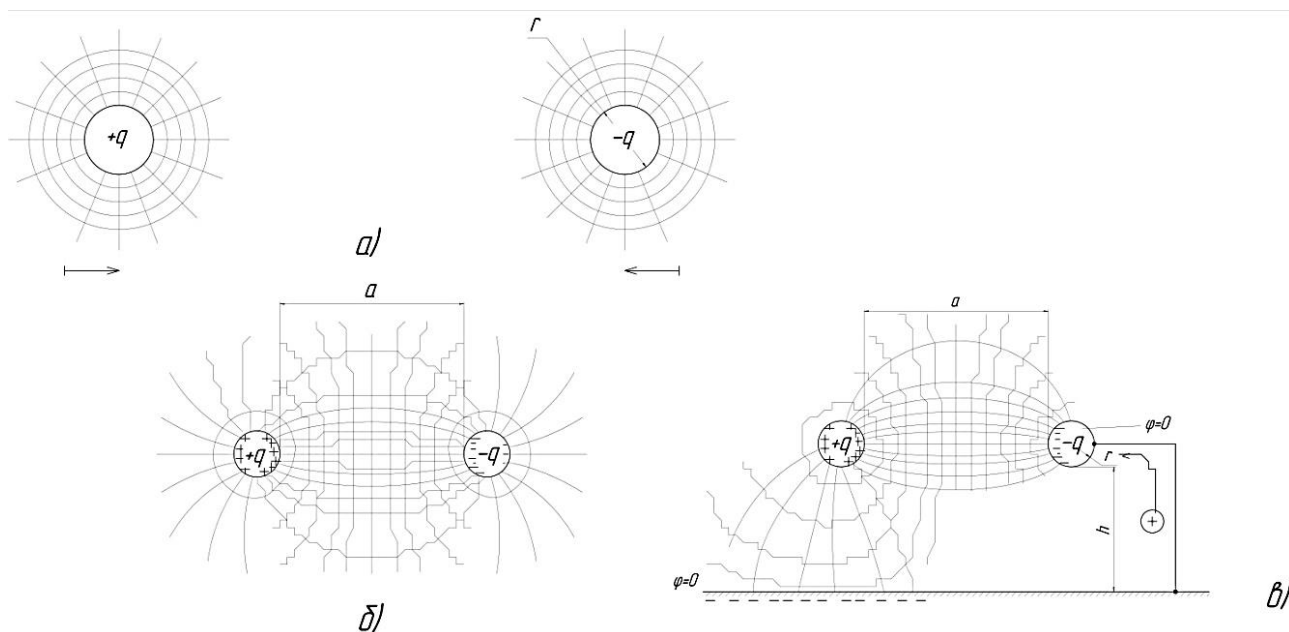


Рис. 1.5 Спотворення електричного поля між двома кульовими зарядами

Для куль, віддалених від заземлених предметів (рис. 1.5, б):

$$f\left(\frac{a}{r}\right) = 0,25 \left[\frac{a}{r} + 1 + \sqrt{\left(\frac{a}{r} + 1\right)^2 + 8} \right]. \quad (1.16)$$

При одній заземленій кулі, а другій – ізольованій, неоднорідність поля на останній буде більшою (рис. 1.5, в)). В цьому випадку збільшення напруженості електричного поля через перерозподіл зарядів враховується коефіцієнтом неоднорідності $f_0\left(\frac{a}{r}\right)$, який визначається практично за допомогою замірів розрядних напруг між кулями (див. табл. 1.2).

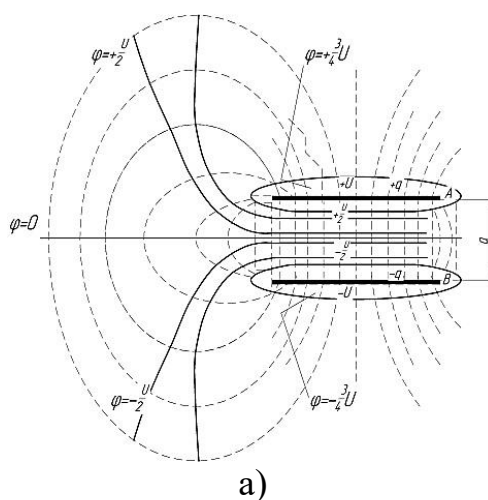
Таблиця 1.2 Коефіцієнти неоднорідності електричного поля $[h = (8 \div 10)r]$

$\frac{a}{r}$	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
$f\left(\frac{a}{r}\right)$	1,03	1,06	1,14	1,215	1,29	1,37	1,44	1,52	1,61	1,69	1,78
$f_0\left(\frac{a}{r}\right)$	1,03	1,06	1,14	1,22	1,31	1,41	1,51	1,62	1,73	1,85	1,97

1.5 Крайовий ефект

Крайовим ефектом називають збільшення напруженості електричного поля (згущення електричних силових ліній) на краях металічних деталей. В електрообладнанні високої напруги крайовий ефект намагаються усунути, так як він викликає шкідливі розряди вздовж поверхні діелектрика (ізолятора), руйнуючи його поверхню, додаткові втрати потужності на коронний розряд, похибки у вимірювальних високовольтних установах.

На рис. 1.6, а) показаний ескіз силових та екіпотенціальних ліній електричного поля плоского конденсатора з гострими кінцями електродів. В середній частині з відстанню між пластинами-електродами a електричне поле однорідне, біля країв електродів поле різко неоднорідне і має велику швидкість зміни потенціалу.



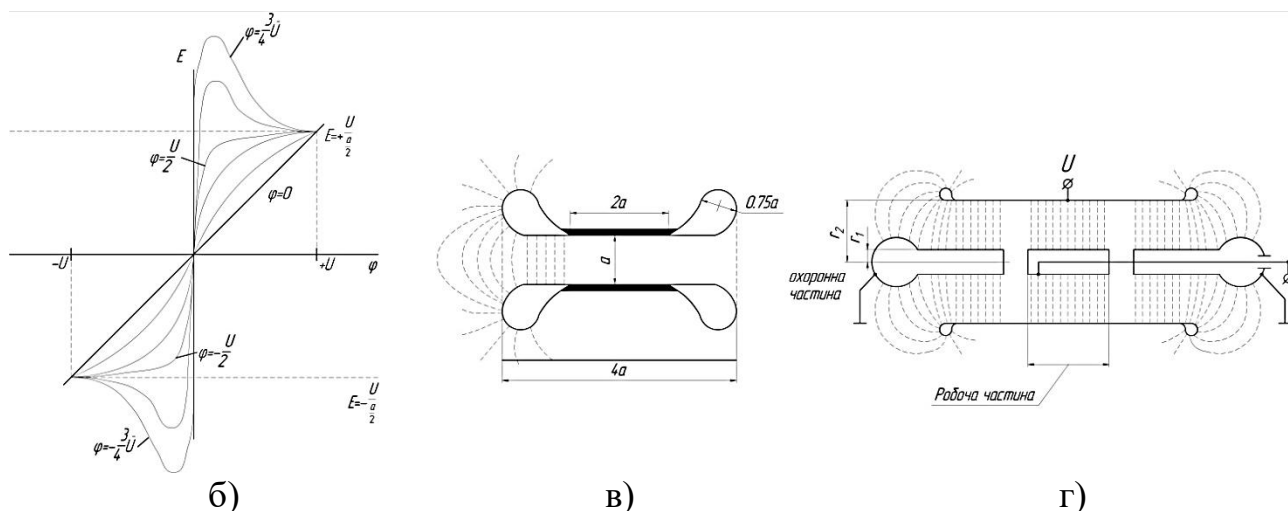


Рис. 1.6 Електричні поля конденсаторів у різних виконаннях:

- а) плоского з гострими краями електродів;
- б) напруженість поля вздовж еквіпотенціальних ліній;
- в) орієнтовний профіль дискових електродів;
- г) циліндричні електроди з екрануванням середньої частини електричного поля

Криві зміни напруженості електричного поля плоского конденсатора (див. рис 1.6, б)) показують, що на еквіпотенціальних лініях з потенціалом $\varphi \geq \frac{U}{2}$ величини напруженості електричного поля досягають значень більших, ніж величина напруженості в однорідній частині поля $E = \frac{U}{a/2}$ всередині пластин-електродів конденсатора, де вплив країв електродів не проявляється.

Одним із способів усунення крайового ефекту є заокруглення гострих країв. Якщо електроди *плоского конденсатора* у вигляді паралельних дисків виконати подібними до еквіпотенціальних поверхонь $\varphi_x = \frac{U}{2}$, то напруженість електричного поля між пластинами у середній частині буде більшою, ніж на краях (див. рис. 1.6, в)). Це дає можливість, наприклад, проводити випробовування на електричну міцність діелектриків між такими електродами, так як саме під пластинами буде максимальна напруженість електричного поля $E_x = \frac{U}{a/2}$. Як правило, при проведенні високовольтних випробовувань

конфігурація електродів відповідає еквіпотенціальним поверхням $\varphi_x = \frac{U}{2}$.

Вкажемо ще на один спосіб усунення крайового ефекту. В лабораторіях ТВН застосовують *циліндричний конденсатор* (див. рис. 1.6, г)), краї зовнішнього циліндра якого (високовольтний електрод) заокруглюють подібно до еквіпотенціальних поверхонь $\varphi_x = \frac{U}{2}$, а внутрішній циліндр ділять на три частини таким чином, що центральна частина (робоча) перебуває в однорідному

електричному полі. При цьому крайні частини відокремлюють від середньої твердим діелектриком і заземлюють. До зовнішнього циліндра підводять високий потенціал, а робочу частину внутрішнього циліндра з'єднують з вимірювальним приладом.

Такий пристрій дозволяє одержати на довжині робочої частини електричне поле однакової напруженості вздовж циліндричних екіпотенціальних поверхонь. Напруженість і ємність електричного поля розраховується згідно формул циліндричного конденсатора. Циліндричний конденсатор такої конструкції використовується як *еталонний* у вимірювальних високовольтних схемах.

Структура електричного поля в циліндричному конденсаторі та поблизу проводів повітряних ліній електропередач практично співпадає. Поле циліндричного конденсатора подібне також полю коаксиального кабелю та полю прохідного ізолятора на деяких його ділянках.

Знайдемо умови, при яких ізоляційна конструкція *циліндричного конденсатора* буде працювати найбільш ефективно. Напруженість електричного поля циліндричного конденсатора максимальна біля поверхні внутрішнього циліндра:

$$E_{\text{макс}} = E_{r_1} = \frac{U}{r_1 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}},$$

де E_{r_1} – напруженість електричного поля на відстані r_1 від осі;

r_2 – радіус зовнішнього циліндра конденсатора.

Із наближенням до зовнішнього циліндра напруженість поля спадає згідно *гіперболічного* закону:

$$\frac{E_x}{E_{\text{макс}}} = \frac{U}{x \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} : \frac{U}{r_1 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{r_1}{x} \approx \frac{1}{x}.$$

Якщо задатися незмінним значенням $r_2 = \text{const}$ та змінювати r_1 , то залежність E_{r_1} від r_1/r_2 буде мати такий вигляд: спочатку при зростанні r_1 напруженість поля від значень $E_{r_1} = E_{\text{макс}}$ різко спадає внаслідок зниження кривизни внутрішнього електроду; потім проявляється протилежна тенденція - підвищення E_{r_1} внаслідок зменшення відстані між електродами, особливо при r_1 близьких до r_2 . *Оптимальне* значення радіуса внутрішнього електроду циліндричного конденсатора r_1 , при якому напруженість електричного поля E_{r_1} приймає мінімальне значення, визначається згідно виразу:

$$\frac{r_{1\text{opt}}}{r_2} = \frac{1}{e},$$

де $e = 2,7182818\dots$ – основа натурального логарифму.

Це співвідношення може бути використане, наприклад, для вибору радіуса внутрішнього електроду (струмопровідної жили) в прохідних ізоляторах.

В ізоляційних конструкціях часто використовуються системи типу коаксиальних циліндричних конденсаторів, які мають відстань між електродами δ малу у порівнянні з радіусами циліндрів. Оскільки радіус зовнішнього електроду $r_2 = r_1 + \delta$, де δ – мала величина, напруженість E_{r_1} близька до E_{r_2} . Це означає, що поле в таких конденсаторах близьке до рівномірного і розрахунок можна вести як для плоского.

1.6 Спотворення електричного поля провідними включеннями в ізоляційних конструкціях

Якщо в електричному полі розмістити *ізолюваний провідник*, то він буде спотворювати поле внаслідок розділення *індукованих* зарядів на його поверхні. В новому результуючому полі дві частини поверхні є еквіпотенціальними поверхнями, а силові лінії нормальні до цих поверхонь (рис. 1.6 д)).

Розподіл напруженості електричного поля на провідній поверхні пов'язаний з її кривизною. В місцях більшої кривизни, наприклад на виступах, напруженість поля різко зростає.

Строгий математичний розв'язок задачі знаходження напруженості електричного поля на поверхні провідних тіл, внесених в електричне поле, був здійснений для таких простих форм як куля та циліндр. Максимальна напруженість електричного поля на поверхні *провідної кулі*, внесеної в *рівномірне* електричне поле напруженістю E_0 рівна: $E_{\text{макс}_K} = 3E_0$, а на поверхні *провідного циліндра* (проводу) $E_{\text{макс}_Ц} = 2E_0$.

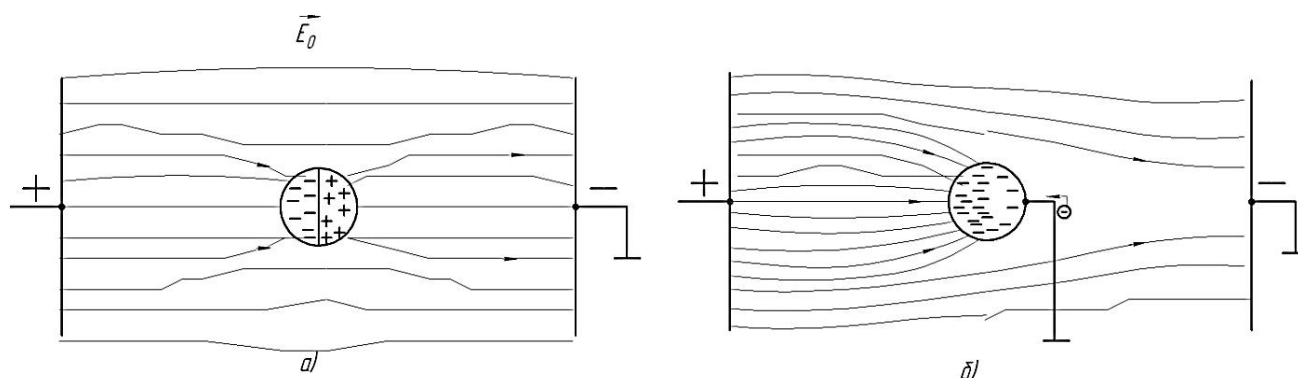


Рис. 1.6 д) Спотворення рівномірного електричного поля при внесенні провідника:
а) ізолюваного; б) заземленого

В обох випадках результуючий вектор $\vec{E}_{\text{макс}}$ направлений вздовж напрямку вектора \vec{E}_0 . Слід відзначити, що в обох випадках величина напруженості електричного поля $E_{\text{макс}}$ не залежить від радіусів кулі чи циліндра. Це пояснюється тим, що із зменшенням радіуса зменшується також момент диполя, утвореного індукованими зарядами.

Якщо ізолювані провідні тіла перебувають у зовнішньому електричному полі і мають розміри такі, що їх можна вважати розташованими на одній

еквіпотенціальній поверхні, то вони набувають потенціал цієї поверхні. Дипольні заряди, наведені на таких тілах, створюють достатньо сильне місцеве поле, підсилююче або послаблююче напруженість поля на поверхні електродів. Однак, це місцеве поле не в змозі змінити потенціал даної точки зовнішнього електричного поля внаслідок малих розмірів ізольованих провідних тіл.

При внесенні у рівномірне електричне поле *заземленого провідного тіла* спостерігається більш різке зростання напруженості поля біля цього електроду, зумовлене стіканням в землю зарядів, послаблюючих поле біля провідника (на рис. 1.6, δ)_б) – це додатні заряди. При цьому потенціал заземленого провідного тіла рівний нулю.

1.6.1 Газові включення у твердій та рідинній ізоляції

В ізоляційних конструкціях твердої та рідинної форм небезпечними є *газові включення*, які можуть утворюватися внаслідок технологічних дефектів. Газові діелектрики володіють найменшою діелектричною проникністю ($\varepsilon \approx 1$, точніше: O - 1,00055; H - 1,00027; N - 1,00060; CO₂ - 1,00096), внаслідок чого напруженість електричного поля у газовому включенні зростає пропорційно до напруженості поля у діелектрику відповідно до величини його діелектричної провідності. Тому у газових включеннях можливий розвиток розряду, що часто зумовлює пробій всієї ізоляційної конструкції.

Як правило, у рідинному ізоляційному середовищі, наприклад трансформаторній оливі, газові включення мають *сферичну* форму. При розрахунку напруженості електричного поля у сфері, радіус якої набагато менший відстані між електродами, зовнішнє електричне поле можна вважати *рівномірним*. Тоді напруженість електричного поля усередині *сфери* обчислюється згідно виразу:

$$E_c = \frac{3 \cdot \varepsilon_1}{\varepsilon_c + 2 \cdot \varepsilon_1} \cdot E_1, \quad (1.17)$$

де ε_c , E_c - діелектрична проникність та напруженість електричного поля у сфері;
 ε_1 , E_1 - те ж в ізоляційному середовищі.

Слід відзначити, що напруженість поля у сфері (газовому включенні) не залежить від її радіуса.

Якщо ізоляційною конструкцією є широко розповсюджена конструкція типу *циліндричного конденсатора*, то розрахунок напруженості електричного поля у місці розташування газового включення може бути здійснений з використанням математичного апарату *градування ізоляції*. При цьому, вся товща ізолятора радіально поділяється на 3 частини з діелектричними проникностями, відповідно, ізолятора - газового включення - ізолятора.

Підсумок

Електричне поле в проміжку «стержень-стержень» отримується з проміжку «стержень-площина» на основі принципу дзеркального відображення. Для

аналітичного вивчення поля стержнів їх поверхня описується рівнянням двопорожнистого гіперболоїда обертання.

Напруженість поля поблизу стержня у проміжку «стержень-площина» майже удвічі перевищує напруженість поля у проміжку «стержень-стержень».

Незважаючи на те, що радіус кривизни кінця стержня може бути дуже малим і розрахункове значення напруженості електричного поля може виявитися надто великим, дійсна величина напруженості поля є обмеженою внаслідок явища *іонізації*. Іонізований простір високої провідності ніби продовжує електрод, але вже з більшим радіусом кривизни.

Само по собі заземлення (надання нульового потенціалу) одного з стержневих електродів не змінює напруженості поля у проміжку, але збільшує напруженість поля незаземленого електроду внаслідок дії сторонніх заземлених предметів.

При дослідженні системи «куля-куля» підбором куль різного діаметра можна проводити заміри у великому діапазоні напруг постійного та змінного струмів (промислової й високої частоти), а також імпульсні напруги тривалістю до декількох мікросекунд.

Найбільша напруженість електричного поля виникає на поверхнях шарів, повернених одна до іншої, в точках на лінії, яка з'єднує центри куль.

Крайовий ефект - збільшення напруженості електричного поля (згущення електричних силових ліній) на краях металічних деталей. Одним із способів усунення крайового ефекту є заокруглення гострих країв.

Якщо електроди плоского конденсатора та зовнішній циліндр циліндричного конденсатора заокруглити подібно до екіпотенціальних поверхонь, то всередині пластин електричне поле буде рівномірним і максимальним для даної конструкції.

Ізольований провідник спотворює електричне поле внаслідок розділення індукованих зарядів на його поверхні. Заземлений провідник більш різко спотворює електричне поле біля цього електроду, внаслідок стікання в землю зарядів, послаблюючих поле біля провідника.

Запитання

Для дослідження яких полів використовуються електроди типу «стержень-стержень» та «стержень-площина»?

Який потенціал повинна мати площина у методі дзеркальних відображень та які дві умови повинні бути виконані, щоб з системи електродів типу «стержень-площина» побудувати систему типу «стержень-стержень»?

Чи справедливе твердження, що ємність системи електродів типу «стержень-площина» рівна ємності системи «стержень-стержень», а також вкажіть зв'язок з напруженістю електричного поля на кінчиках стержнів обох систем?

Чи справедливе твердження, що заземлення одного з електродів проміжку «стержень-стержень», «куля-куля» не спотворює електричне поле між ними, не

змінює напруженості поля у цій системі електродів?

Чи справедливе твердження, що максимальна напруженість електричного поля спостерігається в центрах шарів системи електродів типу «куля-куля»?

Що таке крайовий ефект і як його можна усунути?

Виходячи з яких міркувань необхідно провести зміни в конструкції типу «плоский конденсатор» та «циліндричний конденсатор» для усунення крайового ефекту та чи зміниться при цьому напруженість електричного поля?

Згідно якого закону змінюється напруженість електричного поля між обкладинками циліндричного конденсатора при зміні відстані між ними?

Яким повинно бути співвідношення між радіусами обкладинок циліндричного конденсатора для найбільш ефективної роботи його ізоляційної конструкції?

Чи спотворюють електричне поле внесені в нього ізольоване та з'єднане із землею провідні тіла, а також назвіть відмінності, в тому числі і в потенціалах цих тіл?

ТЕМА 2. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ПОВІТРЯНИХ ЛЕП

Лекція 4

[2, с. 33–39; 9, с. 33–37; 10, с. 34–44]

1.7 Електричне поле однофазної повітряної лінії

Однофазну двопровідну повітряну лінію при розрахунках електричного поля розглядають як два циліндри радіуса r нескінченної довжини, які мають лінійно розповсюджені заряди з густиною q_1 та q_2 , розміщені на відстанях h_1 та h_2 від земної поверхні (провідна, з потенціалом $\varphi_\zeta = 0$) та на відстані D_{12} один від одного (див. рис. 1.7).

Електричне поле заряду, розміщеного поряд з провідною поверхнею може бути знайдене *методом дзеркальних відображень*, при якому вплив всієї провідної поверхні внаслідок дії наведеного в ній заряду замінюється полем дзеркального відображення даного заряду із заміненим на протилежний знак. Дійсно, в полі таких двох зарядів середня площина виявляється еквіпотенціальною з нульовим потенціалом, що і вимагається в дійсності.

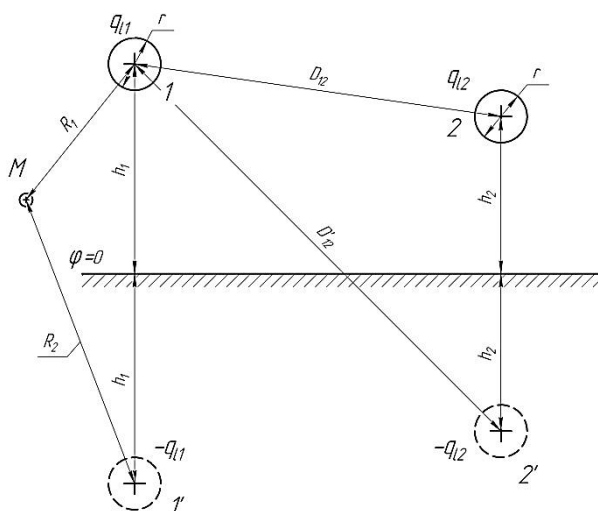


Рис. 1.7 Двopовідна повітряна лінія та її дзеркальне відображення

Метод дзеркальних відображень був розроблений видатним англійським фізиком лордом Кельвіним (William Thomson, 1–st Baron Kelvin) у середині XIX ст. Суттєвий розвиток методу належить іншому англійському фізику XX ст. Дж. Сірлу (John Searle), який застосував його для розрахунку відбиття від поверхні розділу будь-яких двох середовищ.

Отже, визначимо потенціал φ_M , створюваний у довільній точці M зарядом $+q_1$ та його дзеркальним відображенням $-q_1$. Для цього попередньо розглянемо наступний приклад.

Приклад 1.1

Вздовж прямолінійного відрізка визначеної довжини l (див. рис. П 1.1) розподілений електричний заряд з лінійною густиною q_l . Знайти напруженість електричного поля в довільній точці M , яка знаходиться від осі відрізка на відстані r_0 . Радіуси, проведені у точку M з кінців відрізка, утворюють з віссю кути α_1 та α_2 .

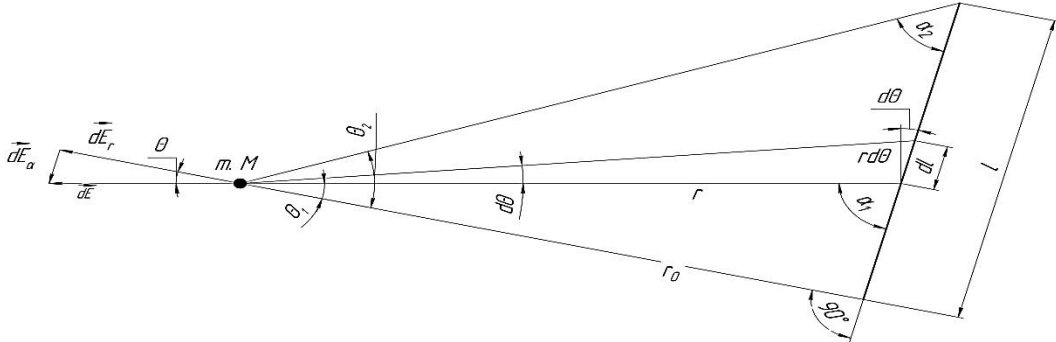


Рис. П 1.1 Напруженість електричного поля від заряду з лінійною густиною

Розв'язок 1.

Для кожного елемента відрізка довжиною dl згідно закону Кулона радіальна та аксіальна складові напруженості електричного поля рівні:

$$dE_r = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q_l \cdot dl}{r^2} \cdot \cos\theta; \quad dE_a = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q_l \cdot dl}{r^2} \cdot \sin\theta.$$

З простих геометричних міркувань для відстані r точки M від відрізка dl знаходимо:

$$dl \cdot \cos\theta = r \cdot d\theta; \quad r = \frac{r_0}{\cos\theta}.$$

Тому

$$E_r = \frac{q_l}{4\pi \cdot \epsilon\epsilon_0 \cdot r_0} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos\theta d\theta = \frac{q_l}{4\pi \cdot \epsilon\epsilon_0 \cdot r_0} \cdot (\sin\theta_2 - \sin\theta_1),$$

а також

$$E_a = \frac{q_l}{4\pi \cdot \epsilon\epsilon_0 \cdot r_0} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin\theta d\theta = \frac{q_l}{4\pi \cdot \epsilon\epsilon_0 \cdot r_0} \cdot (\cos\theta_2 - \cos\theta_1),$$

де $\theta_{1,2} = \frac{1}{2} - \alpha_{1,2}$.

Якщо точка спостереження розміщена симетрично відносно відрізка, то $\theta_1 = -\theta_2$; при цьому аксіальна складова напруженості поля E_a перетворюється в нуль. Для нескінченно довгого рівномірно зарядженого відрізка, наприклад, для **проводу лінії електропередачі** при $r_0 \ll l$, будемо мати: $\theta_2 = -\theta_1 = \frac{\pi}{2}$. А тому

$$E = E_r = \frac{q_l}{2\pi \cdot \epsilon\epsilon_0 \cdot r_0}. \quad (1.18)$$

Розв'язок 2.

Використаємо електростатичну теорему Гауса: потік вектора електричного зміщення \vec{D} через будь-яку замкнену поверхню S залишається постійним і пропорційним заряду Q з лінійною густиною q_l всередині поверхні. Тоді

$$N = \epsilon\epsilon_0 \cdot \oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = Q.$$

В силу симетрії у полі нескінченно довгого однорідно-зарядженого проводу в наявності

тільки радіальна складова напруженості електричного поля ($E = E_r = const$) у всіх точках циліндричної поверхні.

Звідси, для круглої циліндричної поверхні радіуса r_0 , коаксиальної до проводу та обмеженої з торців поверхнями, нормальними до осі, матимемо (див. рис. П 1.2):

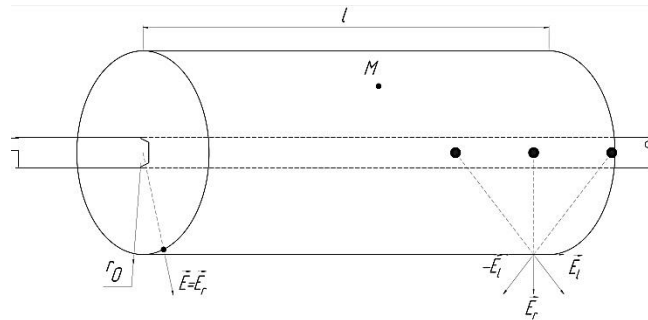


Рис. П 1.2 Електричний провід та екіпотенціальна поверхня електричного поля

$$N = \varepsilon\varepsilon_0 \cdot \oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \varepsilon\varepsilon_0 \cdot E_r \cdot 2\pi r_0 \cdot l = \int q_l \cdot dl = q_l \cdot l.$$

Таким чином маємо той же вираз (див. (1.18)): $E = E_r = \frac{q_l}{2\pi \cdot \varepsilon\varepsilon_0 \cdot r_0}$.

Повернімося тепер до визначення потенціалу φ_M електричного поля у довільній точці M (див. рис. 1.7).

Потенціал, створюваний у точці M першим додатно зарядженим проводом із зарядом $+q_l = +q/l$ на одиниці довжини проводу l :

$$\varphi_{1_M} = - \int_{r_1}^{R_1} E_r dr = - \int_{r_1}^{R_1} \frac{q_l}{2\pi \cdot \varepsilon\varepsilon_0 \cdot r} dr = \frac{q_l}{2\pi \cdot \varepsilon\varepsilon_0} \ln \frac{r_1}{R_1} + const \quad (1.19)$$

Аналогічно, потенціал, створюваний лінійним зарядом $-q_l = -q/l$ дзеркального відображення заряду першого проводу у цій же точці:

$$\varphi_{1'_M} = \frac{-q_l}{2\pi \cdot \varepsilon\varepsilon_0} \ln \frac{r_1}{R_2} + const = \frac{q_l}{2\pi \cdot \varepsilon\varepsilon_0} \ln \frac{R_2}{r_1} + const. \quad (1.20)$$

Тому, потенціал точки M при наявності двох зарядів

$$\varphi_M = \varphi_{1_M} + \varphi_{1'_M} = \frac{q_l}{2\pi \cdot \varepsilon\varepsilon_0} \left(\ln \frac{r_1}{R_1} + \ln \frac{R_2}{r_1} \right) + const = \frac{q_l}{2\pi \cdot \varepsilon\varepsilon_0} \ln \frac{R_2}{R_1} + C. \quad (1.21)$$

Тут C - довільна постійна, яка перетворюється в нуль, якщо виходити з умови, що $\varphi = 0$ при $R_1 = R_2$ (тобто, на провідній поверхні).

Потенціальні коефіцієнти повітряних ліній.

Для однофазної двопровідної повітряної лінії можна знайти наступні співвідношення миттєвих потенціалів проводів, використовуючи вираз (1.21): частковий потенціал (напряга відносно землі) на поверхні першого проводу від зарядів проводів I та I' (переміщаємо т. M на поверхню проводу I ; при цьому $R_1 \rightarrow r_1 = r$; $R_2 \rightarrow 2h_1$):

$$u_1' = \frac{q_1}{2\pi \cdot \varepsilon \varepsilon_0} \ln \frac{2h_1}{r} = \frac{q_1}{2\pi \cdot \varepsilon \varepsilon_0 \cdot l} \ln \frac{2h_1}{r} = \alpha_{11} \cdot q_1, \quad (1.22)$$

а від зарядів проводів 2 та 2'

$$u_1'' = \frac{q_2}{2\pi \cdot \varepsilon \varepsilon_0 \cdot l} \ln \frac{D'_{12}}{D_{12}} = \alpha_{12} \cdot q_2. \quad (1.23)$$

В цих рівняннях D_{12} – відстань між осями проводів 1 та 2; D'_{12} – відстань між осями першого проводу та дзеркального відображення другого (рис.1.7); α_{11} та α_{12} – потенціальні коефіцієнти, $[\Phi^{-1}]$; l – довжина проводу, $[м]$.

Загальний потенціал *першого* проводу:

$$u_1 = u_1' + u_1'' = \alpha_{11} \cdot q_1 + \alpha_{12} \cdot q_2, \quad (1.24)$$

$$\text{де } \alpha_{11} = \frac{1}{2\pi \cdot \varepsilon \varepsilon_0 \cdot l} \ln \frac{2h_1}{r}; \quad \alpha_{12} = \frac{1}{2\pi \cdot \varepsilon \varepsilon_0 \cdot l} \ln \frac{D'_{12}}{D_{12}}.$$

Для *другого* проводу таким же чином одержимо його потенціал:

$$u_2 = \alpha_{21} \cdot q_1 + \alpha_{22} \cdot q_2, \quad (1.25)$$

$$\text{де } \alpha_{21} = \alpha_{12} = \frac{1}{2\pi \cdot \varepsilon \varepsilon_0 \cdot l} \ln \frac{D'_{12}}{D_{12}}; \quad \alpha_{22} = \frac{1}{2\pi \cdot \varepsilon \varepsilon_0 \cdot l} \ln \frac{2h_2}{r}.$$

Як бачимо з рівнянь (1.22) та (1.23) потенціальні коефіцієнти α_{ij} залежать від геометричних розмірів лінії та діелектричної проникності середовища: $\alpha_{ij} = \alpha_{ij}(r, h, D, l, \varepsilon)$. Рівняння (1.24) та (1.25) називають *рівняннями Максвелла 2-го порядку* для миттєвих потенціалів проводів двопровідної лінії.

При *горизонтальному* розміщенні проводів ($h_1 = h_2$) матимемо $\alpha_{11} = \alpha_{22}$; крім того, потенціали проводів однофазної симетричної лінії рівні між собою, але протилежні за знаком: $u_1 = -u_2$. Тоді з формул (1.24) та (1.25) одержимо рівність і протилежність зарядів проводів:

$$\begin{aligned} \alpha_{11}q_1 + \alpha_{12}q_2 &= -\alpha_{12}q_1 - \alpha_{11}q_2; \\ \alpha_{11}q_1 + \alpha_{12}q_1 &= -(\alpha_{11}q_2 + \alpha_{12}q_2); \\ (\alpha_{11} + \alpha_{12})q_1 &= -(\alpha_{11} + \alpha_{12})q_2; \\ q_1 &= -q_2. \end{aligned} \quad (1.26)$$

Відношення заряду проводу q_1 до його потенціалу u_1 визначає робочу ємність C_1 проводу лінії. Тому для *симетричної* однофазної лінії з рівнянь (1.24) та (1.26) матимемо:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{q_1}{u_1} = \frac{1}{\alpha_{11} - \alpha_{12}} = \frac{1}{\frac{1}{2\pi \cdot \varepsilon \varepsilon_0 \cdot l} \ln \frac{2h}{r} - \frac{1}{2\pi \cdot \varepsilon \varepsilon_0 \cdot l} \ln \frac{D'_{12}}{D_{12}}} = \\ &= \frac{2\pi \cdot \varepsilon \varepsilon_0 \cdot l}{\ln \frac{2h \cdot D_{12}}{r \cdot D'_{12}}} \approx \frac{l}{2.9 \cdot 10^9 \ln \frac{D_{12}}{r}} [\Phi]. \end{aligned} \quad (1.27)$$

Тут прийнято до уваги, що для повітряних ліній $\frac{2h}{D'_{12}} \approx 1$, а також $\varepsilon = 1$.

Ємнісні коефіцієнти повітряних ліній.

Рівняння (1.24) та (1.25) для подальших перетворень можна записати у матричній формі:

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix} \text{ або } U = \alpha \cdot Q. \quad (1.28)$$

Визначник 2-го порядку цієї системи рівнянь рівний:

$$D_\alpha = \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{vmatrix} = \alpha_{11} \cdot \alpha_{22} - \alpha_{12} \cdot \alpha_{21} = \alpha_{11} \cdot \alpha_{22} - \alpha_{12}^2.$$

Рішення системи рівнянь (1.28) відносно зарядів при відомих потенціалах проводів матиме наступний вигляд:

$$\begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} \\ \beta_{21} & \beta_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} \text{ або } Q = \alpha^{-1} \cdot U, \quad (1.29)$$

де $\beta_{ik} = \frac{A_{ik}}{D_\alpha}$ – ємнісні коефіцієнти системи рівнянь для повітряних ліній, $[\Phi]$:

$$\begin{aligned} \beta_{11} &= \frac{A_{11}}{D_\alpha} = -\frac{\alpha_{22}}{\alpha_{12}^2 - \alpha_{11} \cdot \alpha_{22}}; \\ \beta_{22} &= \frac{A_{22}}{D_\alpha} = -\frac{\alpha_{11}}{\alpha_{12}^2 - \alpha_{11} \cdot \alpha_{22}}; \\ \beta_{12} &= \beta_{21} = \frac{A_{12}}{D_\alpha} = \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{12}^2 - \alpha_{11} \cdot \alpha_{22}}. \end{aligned}$$

Тут A_{ik} - алгебраїчні доповнення елементів визначника D_α :

$$A_{ik} = (-1)^{i+k} |\alpha_{ik}|: \quad A_{11} = \alpha_{22}; \quad A_{12} = -\alpha_{21}; \quad A_{21} = -\alpha_{12}; \quad A_{22} = \alpha_{11}.$$

Коефіцієнти β_{ii} з однаковими індексами називаються *коефіцієнтами ємності*; вони завжди додатні і чисельно рівні зарядам на відповідних проводах, якщо їх потенціали рівні одиниці, а потенціали інших проводів рівні нулю.

Коефіцієнти β_{ik} з різними індексами називаються *коефіцієнтами електростатичної індукції*; вони від'ємні і визначають величину наведеного заряду зворотного знаку (наприклад, коефіцієнт β_{21} – заряд на першому проводі, коли потенціал на другому рівний одиниці).

Так же як і потенціальні коефіцієнти α_{ij} ємнісні коефіцієнти β_{ik} залежать тільки від геометричних розмірів лінії та діелектричної проникності середовища.

1.8 Часткові ємності проводів

У двопровідній однофазній лінії вводять поняття *часткових ємностей*, які зв'язують попарно між собою всі проводи: ємність між проводами $C_{12} = C_{21}$, ємність проводів відносно землі C_{11} та C_{22} (див. рис.1.8) і є частинами загальної (робочої) ємності лінії.

Дійсно, ємності C_{11} та C_{22} через землю з'єднані послідовно між проводами, а тому сумарна *робоча ємність лінії* C_p рівна:

$$C_p = C_{12} + \frac{C_{11} \cdot C_{22}}{C_{11} + C_{22}}. \quad (1.30)$$

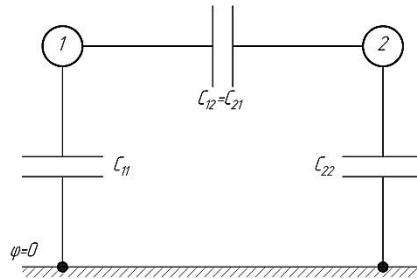


Рис. 1.8. Часткові ємності двопровідної однофазної лінії

Оскільки для *симетричної* лінії $C_{11} = C_{22}$, то

$$C_p = C_{12} + \frac{C_{11}}{2} = \frac{C_{11} + 2C_{12}}{2}.$$

(1.31)

Виразимо заряди кожного з проводів через потенціали та часткові ємності, вважаючи потенціал землі рівним нулю:

$$\begin{cases} q_1 = C_{11}u_1 + C_{12}(u_1 - u_2) = (C_{11} + C_{12})u_1 - C_{12}u_2; \\ q_2 = C_{22}u_2 + C_{21}(u_2 - u_1) = -C_{21}u_1 + (C_{22} + C_{21})u_2. \end{cases}$$

(1.32)

Порівнюючи останні рівняння з (1.29), матимемо:

$$\beta_{11} = C_{11} + C_{12}; \quad \beta_{22} = C_{21} + C_{22}; \quad \beta_{12} = \beta_{21} = -C_{12} = -C_{21};$$

або

$$C_{11} = \beta_{11} + \beta_{12}; \quad C_{22} = \beta_{22} + \beta_{21}; \quad C_{12} = C_{21} = -\beta_{12}. \quad (1.33)$$

Так як в симетричній однофазній лінії $u_2 = -u_1$, за допомогою (1.32) можна знайти вираз для *робочої ємності проводу* C_1 через часткові ємності:

$$C_1 = \frac{q_1}{u_1} = C_{11} + 2C_{12}. \quad (1.34)$$

Отже, робоча ємність проводу симетричної лінії у 2 рази більша робочої ємності лінії (див. (1.31)).

1.9 Напруженість електричного поля на поверхні проводу

В повітряних лініях при великих відстанях між проводами можна вважати, що величина напруженості електричного поля біля поверхні проводів у всіх точках однакова. Це дозволяє максимальну напруженість на поверхні проводів визначати з відповідного виразу для циліндричного конденсатора (див. 1.18):

$$E_{1_M} = \frac{q_{1_M}}{2\pi \cdot \varepsilon \varepsilon_0 \cdot r \cdot l} = \frac{C_1 \cdot U_{1_M}}{2\pi \cdot \varepsilon \varepsilon_0 \cdot r \cdot l}, \quad (1.35)$$

де q_1 – заряд на проводі, наприклад, першому;

U_{1_M} – максимальне значення потенціалу першого проводу;

r – радіус проводу;

l – довжина проводу.

Підставивши замість ємності C_1 її значення для *симетричної* однофазної лінії з (1.27), отримаємо

$$E_{1_j} = \frac{U_{1_M}}{r \cdot \ln \frac{D_{12}}{r}}. \quad (1.36)$$

Якщо висота підвісу проводів неоднакова ($h_1 \neq h_2$), то величина напруженості на поверхні проводів буде різною. В цьому випадку необхідно в (1.35) підставити значення зарядів q_1 та q_2 , обчислені згідно рівнянь (1.27) та (1.29).

Підсумок

Електричне поле заряду, розміщеного поряд з провідною поверхнею може бути знайдене методом дзеркальних відображень, при якому вплив всієї провідної поверхні внаслідок дії наведеного в ній заряду замінюється полем дзеркального відображення даного заряду із заміненним на протилежний знак.

Рівняння Максвелла 2-го порядку $U = \alpha \cdot Q$ пов'язує миттєві потенціали й заряди проводів двопровідної лінії.

Потенціальні коефіцієнти $\alpha_{ij} = \alpha_{ij}(r, h, D, l, \varepsilon)$ залежать від геометричних розмірів лінії та діелектричної проникності середовища.

При горизонтальному розміщенні проводів ($h_1 = h_2$) потенціальні коефіцієнти $\alpha_{11} = \alpha_{22}$; потенціали проводів $u_1 = -u_2$; заряди проводів $q_1 = -q_2$.

Коефіцієнти β_{ii} з однаковими індексами називаються коефіцієнтами ємності; вони завжди додатні і чисельно рівні зарядам на відповідних проводах, якщо їх потенціали рівні одиниці, а потенціали інших проводів рівні нулю.

Коефіцієнти β_{ik} з різними індексами називаються коефіцієнтами електростатичної індукції; вони від'ємні і визначають величину наведеного заряду зворотного знаку (наприклад, коефіцієнт β_{21} – заряд на першому проводі, коли потенціал на другому рівний одиниці).

Часткові ємності зв'язують попарно між собою всі проводи: ємність між проводами, ємність проводів відносно землі та і є частинами загальної (робочої) ємності лінії.

Робоча ємність проводу симетричної лінії у 2 рази більша робочої ємності лінії.

Максимальна напруженість на поверхні проводів визначається з виразу для

циліндричного конденсатора, при цьому величина заряду визначається з відповідного перетвореного рівняння Максвелла відносно зарядів.

Запитання

Яким повинен бути потенціал поверхні симетрії, щоб визначати напруженість електричного поля на поверхні проводів методом дзеркальних відображень?

Скільки рівнянь необхідно записати для визначення миттєвих потенціалів проводів двопровідної лінії?

Як називаються складові, що з'єднують миттєві потенціали й заряди на проводах двопровідної лінії та від чого кожний з них залежить?

Яку умову необхідно виконати, щоб отримати рівність і протилежність зарядів проводів?

Як обчислюються алгебраїчні доповнення елементів визначника системи рівнянь Максвелла для миттєвих потенціалів проводів двопровідної лінії?

Який фізичний зміст мають коефіцієнти рівнянь Максвелла, утворені за допомогою алгебраїчних доповнень і від чого вони залежать?

Як називаються ємнісні елементи, що зв'язують попарно між собою проводи двопровідної лінії?

Чи справедливе твердження, що робоча ємність симетричної двопровідної лінії у 3 рази більша робочої ємності проводу цієї лінії?

Чи справедливе твердження, що максимальна напруженість електричного поля на поверхні проводу двопровідної лінії обернено пропорційна ємності цього проводу й прямо пропорційна його максимальному потенціалу?

Чи справедливе твердження, що величина напруженості електричного поля на поверхні проводів двопровідної лінії обернено пропорційна їх зарядам, величина яких, у свою чергу, не залежить від геометричних розмірів лінії?

ЛЕКЦІЯ №5
[6, с. 157–174; 9, с. 37–41; 10, с. 34–44]

1.10 Електричне поле трифазної повітряної лінії

Розглянемо трифазну повітряну лінію з *горизонтальним* розміщенням 3-х проводів (рис.1.9).

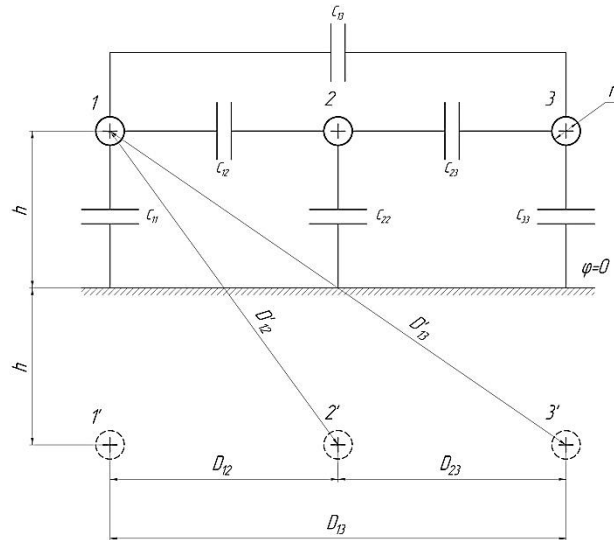


Рис. 1.9 - Трипроводна повітряна лінія з горизонтальним розміщенням проводів та її дзеркальне відображення

Рівняння, які зв'язують *миттєві* потенціали проводів та заряди проводів, аналогічно рівнянням (1.24) та (1.25), можна отримати з використанням методу дзеркальних відображень і записати у вигляді системи *рівнянь Максвелла III-го порядку* з потенціальними коефіцієнтами α_{ik} :

$$\begin{cases} u_1 = \alpha_{11}q_1 + \alpha_{12}q_2 + \alpha_{13}q_3 \\ u_2 = \alpha_{21}q_1 + \alpha_{22}q_2 + \alpha_{23}q_3 \\ u_3 = \alpha_{31}q_1 + \alpha_{32}q_2 + \alpha_{33}q_3 \end{cases} \quad (1.37)$$

або у матричній формі

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix}.$$

Тут

$$\alpha_{11} = \alpha_{22} = \alpha_{33} = \frac{1}{2\pi \cdot \epsilon \epsilon_0 \cdot l} \ln \frac{2h}{r} \text{ при } h = h_1 = h_2 = h_3;$$

$$\alpha_{12} = \alpha_{21} = \alpha_{23} = \alpha_{32} = \frac{1}{2\pi \cdot \epsilon \epsilon_0 \cdot l} \ln \frac{D'_{12}}{D_{12}};$$

$$\alpha_{13} = \alpha_{31} = \frac{1}{2\pi \cdot \epsilon \epsilon_0 \cdot l} \ln \frac{D'_{13}}{D_{13}}.$$

Розв'язавши систему рівнянь (1.37) відносно зарядів, отримаємо систему рівнянь з ємнісними коефіцієнтами:

$$\begin{cases} q_1 = \beta_{11}u_1 + \beta_{12}u_2 + \beta_{13}u_3 \\ q_2 = \beta_{21}u_1 + \beta_{22}u_2 + \beta_{23}u_3 \\ q_3 = \beta_{31}u_1 + \beta_{32}u_2 + \beta_{33}u_3 \end{cases} \quad (1.38)$$

або у матричній формі

$$\begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \beta_{13} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \beta_{23} \\ \beta_{31} & \beta_{32} & \beta_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}.$$

Тут $\beta_{ik} = \frac{A_{ik}}{D_\alpha}$ - ємнісні коефіцієнти системи рівнянь III-го порядку;

$A_{ik} = (-1)^{i+k} |\alpha_{ik}|$ - алгебраїчні доповнення елементів визначника D_α системи рівнянь (1.37);

$$D_\alpha = \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{vmatrix} = \alpha_{11} \cdot \begin{vmatrix} \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{vmatrix} - \alpha_{12} \cdot \begin{vmatrix} \alpha_{21} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{33} \end{vmatrix} + \alpha_{13} \cdot \begin{vmatrix} \alpha_{21} & \alpha_{22} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} \end{vmatrix} \quad - \quad \text{визначник}$$

системи рівнянь III-го порядку.

У випадку *горизонтального* розміщення проводів лінії матимемо:

$$D_\alpha = \alpha_{11}^3 - 2 \cdot \alpha_{11} \cdot \alpha_{12}^2 + 2 \cdot \alpha_{13} \cdot \alpha_{12}^2 - \alpha_{11} \cdot \alpha_{13}^2. \quad (1.39)$$

Алгебраїчні доповнення елементів визначника D_α системи рівнянь (1.37)

будуть наступні:

$$\begin{aligned} A_{11} &= (-1)^{1+1} \cdot \begin{vmatrix} \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{vmatrix}; & A_{12} &= (-1)^{1+2} \cdot \begin{vmatrix} \alpha_{21} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{33} \end{vmatrix}; & A_{13} &= (-1)^{1+3} \cdot \begin{vmatrix} \alpha_{21} & \alpha_{22} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} \end{vmatrix}; \\ A_{21} &= (-1)^{2+1} \cdot \begin{vmatrix} \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{vmatrix}; & A_{22} &= (-1)^{2+2} \cdot \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{13} \\ \alpha_{31} & \alpha_{33} \end{vmatrix}; & A_{23} &= (-1)^{2+3} \cdot \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} \end{vmatrix}; \\ A_{31} &= (-1)^{3+1} \cdot \begin{vmatrix} \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{22} & \alpha_{23} \end{vmatrix}; & A_{32} &= (-1)^{3+2} \cdot \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{23} \end{vmatrix}; & A_{33} &= (-1)^{3+3} \cdot \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (1.40)$$

Враховуючи зсув за фазою між миттєвими потенціалами u_1 , u_2 та u_3 можна обчислити величини зарядів q_1 , q_2 та q_3 .

Максимальна напруженість електричного поля на поверхні кожного з проводів визначається згідно виразу:

$$E_{\text{макс}} = \frac{q_{\text{макс}}}{2\pi \cdot \epsilon \epsilon_0 \cdot l \cdot r}. \quad (1.41)$$

При цьому ємність фази лінії $C = \frac{q}{u}$. Так як зв'язок між зарядом q та потенціалом u лінійний, то співвідношення (1.41) справедливі і при максимальних, і при діючих значеннях заряду й потенціалу змінного струму.

Виразимо рівняння (1.38) за допомогою часткових ємностей:

$$\begin{cases} q_1 = C_{11}u_1 + C_{12}(u_1 - u_2) + C_{13}(u_1 - u_3) \\ q_2 = C_{21}(u_2 - u_1) + C_{22}u_2 + C_{23}(u_2 - u_3) \\ q_3 = C_{31}(u_3 - u_1) + C_{32}(u_3 - u_2) + C_{33}u_3 \end{cases} \quad (1.42)$$

Порівнюючи (1.38) та (1.42), отримуємо вирази, за допомогою яких можна знайти співвідношення між геометричними розмірами трифазної системи проводів та їх частковими ємностями:

$$\begin{aligned} C_{11} &= \beta_{11} + \beta_{12} + \beta_{13}; & C_{12} &= -\beta_{12}; & C_{13} &= -\beta_{13}; \\ C_{22} &= \beta_{21} + \beta_{22} + \beta_{23}; & C_{21} &= -\beta_{21}; & C_{23} &= -\beta_{23}; \\ C_{33} &= \beta_{31} + \beta_{32} + \beta_{33}; & C_{31} &= -\beta_{31}; & C_{32} &= -\beta_{32}. \end{aligned} \quad (1.43)$$

1.10.1 Трифазна симетрична лінія

В трифазній симетричній лінії (див. рис. 1.10) $u_1 - u_2 = 2\sqrt{u_1^2 - \frac{1}{4}u_1^2} = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot u_1 \sqrt{3} = \sqrt{3} \cdot u_1$; $(u_1 - u_3)$ також рівна $\sqrt{3} \cdot u_1$.

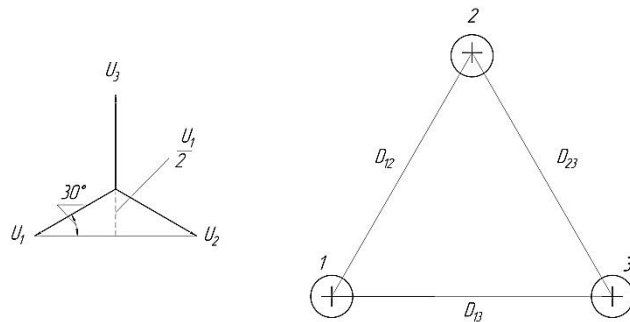


Рис. 1.10 - Трифазне симетричне розміщення проводів

Тому, із системи рівнянь (1.42) для рівняння однієї фази лінії її ємність через часткові ємності рівна:

$$C_1 = \frac{q_1}{u_1} = C_{11} + \sqrt{3}(C_{12} + C_{13}), \quad (1.44)$$

а через геометричні розміри повітряної лінії при допущенні, що через рівність відстаней між дзеркальним відображенням зарядів $D'_{12} \approx D'_{13} \Rightarrow \alpha_{12} \approx \alpha_{13}$, маємо:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{q_1}{u_1} = \frac{q_1}{\alpha_{11}q_1 + \alpha_{12}q_2 + \alpha_{13}q_3} = \frac{q_1}{\alpha_{11}q_1 + \left(-\frac{1}{2}\alpha_{12}q_1 - \frac{1}{2}\alpha_{13}q_1\right)} = \\ &= \frac{1}{\alpha_{11} - \alpha_{12}} = \frac{1}{\frac{1}{2\pi \cdot \epsilon \epsilon_0 \cdot l} \ln \frac{2h}{r} - \frac{1}{2\pi \cdot \epsilon \epsilon_0 \cdot l} \ln \frac{D'_{12}}{D_{12}}} = \end{aligned}$$

$$= \frac{2\pi \cdot \varepsilon \varepsilon_0 \cdot l}{\ln \frac{D}{r}} = \frac{l}{2 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot \ln \frac{D}{r}} \left[\frac{\Phi}{\text{м}} \right], \quad (1.45)$$

де D - відстань між проводами радіуса r симетричної лінії довжиною l .

Тут використана така властивість трифазної лінії: якщо на будь-якому фазному проводі, наприклад l , в деякий момент часу миттєве значення напруги буде максимальним $u_1 = u_{\text{макс}}$, то на інших фазних проводах $u_2 = u_3 = -\frac{1}{2}u_1 \Rightarrow q_2 = q_3 = -\frac{1}{2}q_1$, а також очевидні рівняння: $2h \approx D'_{12}$ та $D_{12} = D$.

Максимальна напруженість електричного поля на поверхні проводів трифазної симетричної повітряної лінії, якщо нехтувати впливом землі, визначається з виразу (див. табл. В1):

$$E = \frac{(1,05 \dots 1,15) \cdot \sqrt{2} \cdot U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot r \cdot l \cdot \ln \frac{D}{r}} \left[\frac{B}{\text{м}} \right]. \quad (1.46)$$

1.11 Напруженість електричного поля на поверхні розщеплених проводів

Лінії електропередачі напругою до 220 кВ включно виконуються, як правило, одиночними проводами, тобто кожна фаза лінії складається тільки з одного проводу. Відстань a між проводами (фазами) набагато більша радіуса проводів r_0 . Якщо заданий питомий поздовжній заряд q/l на проводі, то електричне поле поблизу проводу може розраховуватися як для ізолизованого циліндра в просторі. А саме:

$$E = \frac{q_l}{2\pi \cdot \varepsilon \varepsilon_0 \cdot r_0} = 1,8 \cdot \frac{q_l}{r_0} \left[\frac{B}{\text{м}} \right], \quad (1.47)$$

де $[q_l] = \frac{nKл}{\text{м}}$; $[r_0] = \text{м}$; $\varepsilon = 1$.

На лініях передачі надвисокої напруги кожна фаза складається з двох, трьох, чотирьох або більше окремих проводів, які розміщуються на деякій віддалі один від одного. Це так зване *розщеплення проводу*. Всі проводи в пучку знаходяться під одним потенціалом.

Розщеплені проводи розміщуються симетрично на периметрі кола радіуса R (див. рис. 1.11), причому відстань між проводами a на порядок перевищує радіус проводів r_0 . Якщо кількість проводів у пучку рівна n , то сусідні проводи розділені дугою кола, рівною $2\pi/n$ радіан. Проводи утримуються в заданому розміщенні за допомогою перетинок, які встановлюються вздовж лінії.

Розглянемо електричне поле на поверхні розщеплених проводів, якщо заданий питомий заряд $q_l = q/l$ всього пучка проводів однієї фази. Внаслідок симетричного розміщення проводів у пучку заряд кожного проводу рівний q_l/n .

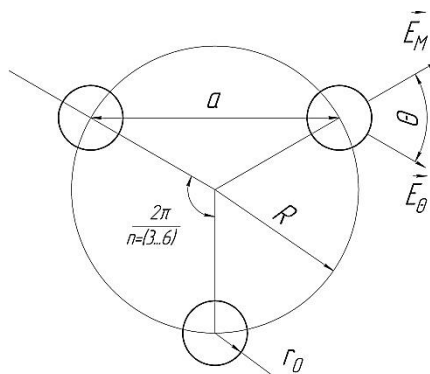


Рис. 1.11 - Розміщення розщеплених проводів у пучку фази

Для розрахунку електричного поля поблизу проводів використовується принцип накладення (суперпозиції): результуюча напруженість поля рівна сумі напруженостей, створюваних кожним зарядом окремо. Поле кожного проводу у відсутності інших проводів визначається згідно (1.18). Електричне поле системи проводів визначається векторним сумуванням окремих складових у кожній точці простору.

На рис 1.12 подано ескіз електричного поля одиночного проводу й розщепленого на п'ять складових того ж січення, пучка проводу однієї фази.

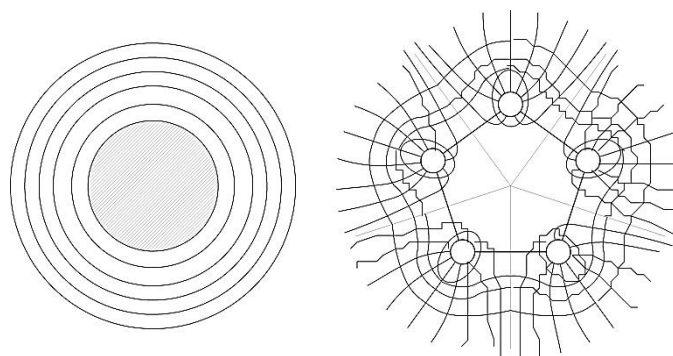


Рис. 1.12 - Ескіз електричних полів одиночного проводу та розщепленого на п'ять проводів

Внаслідок однойменності заряду на кожному з проводів пучка відбувається його виштовхування і підвищення концентрації на зовнішніх поверхнях пучка проводів, результатом чого є викривлення та перерозподіл силових ліній електричного поля: наявністю максимальних напруженостей поля на зовнішній стороні пучка та мінімальних – на внутрішній стороні.

Середня напруженість електричного поля на поверхні одного з розщеплених проводів при відсутності дії зарядів інших проводів обчислюється згідно виразу:

$$E_{cp} = 1,8 \cdot \frac{q_l}{n \cdot r_0} \left[\frac{B}{M} \right]. \quad (1.44)$$

Напруженість електричного поля на поверхні одного із системи розщеплених проводів, яка відповідає куту θ (див. рис. 1.11), є складеною величиною і з точністю до члена ряду r_0^2/a^2 обчислюється згідно виразу:

$$E_{\theta} = E_{cp} \cdot \left(1 + \gamma \cdot \frac{r_0}{a} \cdot \cos \theta \right), \quad (1.45)$$

де $\gamma = 2(n-1) \cdot \sin \frac{\pi}{n}$ – поправочний коефіцієнт розщеплення проводів;

n – кількість розщеплених проводів у пучку;

r_0 – радіус проводу, см;

a – відстань між проводами (крок розщеплення).

В точці $\theta = 0$ напруженість електричного поля максимальна:

$$E_0 = E_{max} = E_{cp} \cdot \left(1 + \gamma \cdot \frac{r_0}{a} \right) = k \cdot E_{cp}, \quad (1.46)$$

де $k = 1 + \gamma \cdot \frac{r_0}{a}$ – поправочний коефіцієнт максимуму електричного поля.

В точці $\theta = \pi$ напруженість електричного поля мінімальна:

$$E_{\pi} = E_{min} = E_{cp} \cdot \left(1 - \gamma \cdot \frac{r_0}{a} \right).$$

Розрахунки згідно цих формул показують, що напруженості поля на поверхні проводів зменшуються із збільшенням числа проводів n у пучку при їх незмінному сумарному січенні, що і є метою застосування розщеплених проводів на ЛЕП надвисокої напруги.

При розрахунках питомого заряду q_l розщеплених проводів їх пучок у фазі заміщають *еквівалентним* (уявним) одиночним проводом тієї ж *ємності*, що й розщеплена фаза, радіус якого r_e обчислюють згідно виразу:

$$r_e = \sqrt[n]{r_0 \cdot \left(\frac{a}{\sin \frac{\pi}{n}} \right)^{n-1} \cdot \prod_{k=1}^{n-1} \sin \frac{k}{n} \pi} \text{ [м]}. \quad (1.47)$$

Значення коефіцієнтів γ та k , а також еквівалентного радіуса r_e для пучка з (2 ... 6) проводів наведені у табл. 1.3.

Таблиця 1.3 - Значення коефіцієнтів розщеплення та еквівалентного радіуса

Число проводів у фазі n	2	3	4	5	6
Коефіцієнт γ	2	$2 \cdot \sqrt{3}$	$3 \cdot \sqrt{2}$	4,702	5
Коефіцієнт k	$1 + 2 \cdot \frac{r_0}{a}$	$1 + 2\sqrt{3} \cdot \frac{r_0}{a}$	$1 + 3\sqrt{2} \cdot \frac{r_0}{a}$	$1 + 4,7 \cdot \frac{r_0}{a}$	$1 + 5 \cdot \frac{r_0}{a}$
Еквівалентний радіус r_e	$\sqrt{r_0 \cdot a}$	$\sqrt[3]{r_0 \cdot a^2}$	$\sqrt[4]{\sqrt{2} \cdot r_0 \cdot a^3}$	$\sqrt[5]{2,618 \cdot r_0 \cdot a^4}$	$\sqrt[6]{6 \cdot r_0 \cdot a^5}$

1.12 Коефіцієнт шорсткості (негладкості) проводів

У всіх вище наведених розрахунках фазовий провід був представлений як гладкий циліндр. Насправді ж, мідні та алюмінієві проводи скручуються з жил малого січення, а розміщений у центрі сталевий провід більшого січення забезпечує механічну міцність всієї конструкції.

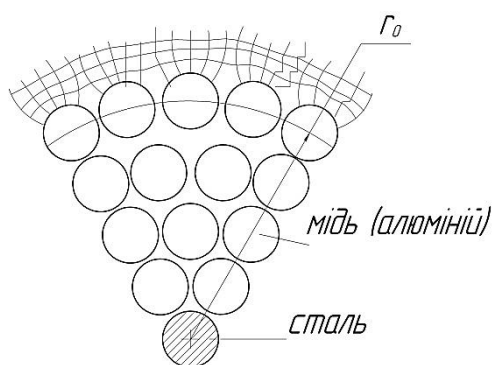


Рис. 1.13 - Електричне поле біля поверхні багатожильного проводу

Ескіз електричного поля поблизу поверхні багатожильного проводу показаний на рис. 1.13. На поверхні такого багатожильного проводу розміщується зовнішній *навив* струмопровідних жил.

Зростання напруженості електричного поля на поверхні зовнішнього навиву пучка проводів, зумовлене більшою кривизною жил у порівнянні з гладкою одноциліндричною поверхнею, враховується коефіцієнтом шорсткості (негладкості) m . Його залежність від числа жил n' у зовнішньому шарі витого проводу показана графіком на рис. 1.14. В границі при $n \rightarrow \infty$ коефіцієнт негладкості $m \rightarrow 0,717$.

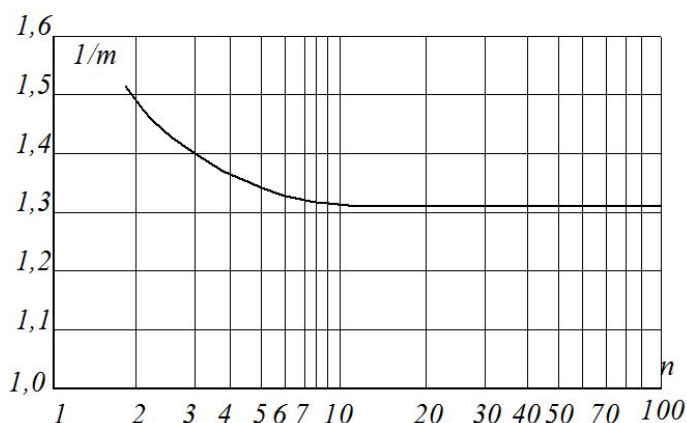


Рис. 1.14 - Залежність коефіцієнта негладкості m від числа жил n' у зовнішньому навиві пучка проводів

Якщо розрахунок, виконаний для гладкого проводу, дав значення напруженості електричного поля $E_{\text{макс}}$, то максимальна напруженість електричного поля на поверхні витого проводу

$$E_{\text{в,макс}} = E_{\text{макс}} \cdot \frac{1}{m}. \quad (1.48)$$

Ця напруженість характеризує зовнішні поверхні жил верхнього навиву. В точках дотику жил напруженість електричного поля мінімальна.

Зниження напруженості $E_{\text{в,макс}}$ до значень $E_{\text{макс}}$ може бути досягнуте накладенням на провід металічного гладкого екрану. Такий спосіб використовується у металічних кабелях.

Підсумок

У трифазній повітряній лінії з *горизонтальним* розміщенням 3-х проводів рівняння, які зв'язують миттєві потенціали та заряди проводів, отримують з використанням методу дзеркальних відображень і записують у вигляді системи *рівнянь Максвелла III-го порядку* з потенціальними коефіцієнтами α_{ik} , розв'язавши яку відносно зарядів отримують систему рівнянь з ємнісними коефіцієнтами β_{ik} . Враховуючи зсув за фазою між миттєвими потенціалами u_i обчислюють величини зарядів q_i й максимальну напруженість електричного поля на поверхні кожного з проводів трифазної повітряної лінії.

На лініях передачі надвисокої напруги (330 кВ і вище) кожна фаза складається з двох і більше окремих проводів, які розміщуються на деякій віддалі один від одного - *розщеплення проводу*.

При розрахунках питомого заряду q_i розщеплених проводів їх пучок у фазі заміщають *еквівалентним* (уявним) одиночним проводом тієї ж *ємності*, що й розщеплена фаза.

Оскільки конструктивно провід розщепленої фази є багатожильним, то відбувається зростання напруженості електричного поля на поверхні зовнішнього навиву пучка проводів,

Запитання

Яким повинен бути потенціал поверхні симетрії, щоб визначати напруженість електричного поля на поверхні проводів методом дзеркальних відображень?

Скільки рівнянь необхідно записати для визначення миттєвих потенціалів проводів трипровідної лінії?

Як називаються складові, що зв'язують миттєві потенціали й заряди на проводах трипровідної лінії та від чого кожний з них залежить?

Як обчислюються алгебраїчні доповнення елементів визначника системи рівнянь Максвелла для миттєвих потенціалів проводів трипровідної лінії?

Який фізичний зміст мають коефіцієнти рівнянь Максвелла, утворені за допомогою алгебраїчних доповнень і від чого вони залежать?

Як називаються ємнісні елементи, що зв'язують попарно між собою проводи трипровідної лінії?

Чи справедливе твердження, що робоча ємність симетричної трипровідної лінії у 3 рази більша робочої ємності проводу цієї лінії?

Чи справедливе твердження, що максимальна напруженість електричного поля на поверхні проводу трипровідної лінії обернено пропорційна ємності цього проводу й прямо пропорційна його максимальному потенціалу?

Чи справедливе твердження, що величина напруженості електричного поля на поверхні проводів трипровідної лінії обернено пропорційна їх зарядам, величина яких, у свою чергу, не залежить від геометричних розмірів лінії?

ТЕМА 3. МЕТОДИ РЕГУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ ІЗОЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК

ЛЕКЦІЯ №6

[1, с. 316–354; 2, с. 42–53; 5, с. 28–45; 12, с. 130–138]

1.13 Методи регулювання електричних полів

Розміри електроізоляційних виробів та їх форма визначаються стійкістю до механічних, електричних та теплових діючих факторів. В більшості випадків при конструюванні електричної ізоляції не вдається використати найкращу її форму з точки зору одержання найбільш вигідного для роботи електроізоляційних матеріалів *рівномірного поля*. В реальному ж, *нерівномірному*, електричному полі окремі ділянки ізоляційної конструкції несуть *підвищене* електричне навантаження, що зумовлює швидке руйнування матеріалів перенавантажених ділянок, а ті частини, що залишились, піддаються дії підвищеної напруженості електричного поля, що також є причиною їх руйнування.

Роботоздатність електричної ізоляції підвищується *вирівнюванням* (регулюванням) електричного поля в конструкції. Практично, здійснюють вирівнювання **двома способами**: змінюючи *активну провідність* або змінюючи *ємність* окремих ділянок ізоляції.

Регулюванням електричного поля першим способом здійснюють шляхом підвищення **активної провідності** окремих ділянок ізоляції, що зумовлює зменшення на них спаду напруги і опору електроізоляційної конструкції. Негативним наслідком є при цьому збільшення діелектричних втрат на промисловій частоті та температури. Зміни активної провідності добиваються декількома шляхами:

- підбором електроізоляційних матеріалів з різною *провідністю*;
- використанням активних *подільників напруги*;
- встановленням *коронуючих електродів*;
- застосуванням *півпровідних покриттів*.

Найбільш дієвими з цих методів є застосування *коронуючих електродів* (у місці коронного розряду спад напруги зменшується і розподіл потенціалів стає рівномірнішим), а також - *півпровідних покриттів* – матеріалів з підвищеною провідністю, наприклад, модифікована глазур, питомий об'ємний опір якої на порядок нижчий від традиційної глазури (підвищується напруга виникнення поверхневих розрядів внаслідок пониження найбільшої напруженості електричного поля на границі розділу двох середовищ). Крім цього, півпровідне покриття підвищує температуру ізоляції за рахунок струму витоку, що сприяє підсушуванню поверхні й збільшенню розрядних характеристик у вологій та забрудненій атмосфері.

Другий спосіб регулювання електричних полів заснований на **збільшенні ємності** тих ділянок електричної ізоляції, у яких необхідне зниження спаду напруги. Збільшення ємності окремих ділянок ізоляції досягають такими способами:

- *градуванням ізоляції* – розміщенням у тих місцях, де необхідно знизити спад напруги, діелектриків з підвищеною діелектричною проникністю;
- застосуванням внутрішніх та зовнішніх *екранів*;
- застосуванням *конденсаторних обкладинок*.

1.13.1 Вирівнювання електричного поля зовнішніми екранами

Розглянемо більш детально ефективність застосування зовнішніх екранів для ізоляційних конструкцій ЛЕП у вигляді гірлянди ізоляторів, як це показано на рис. 1.15.

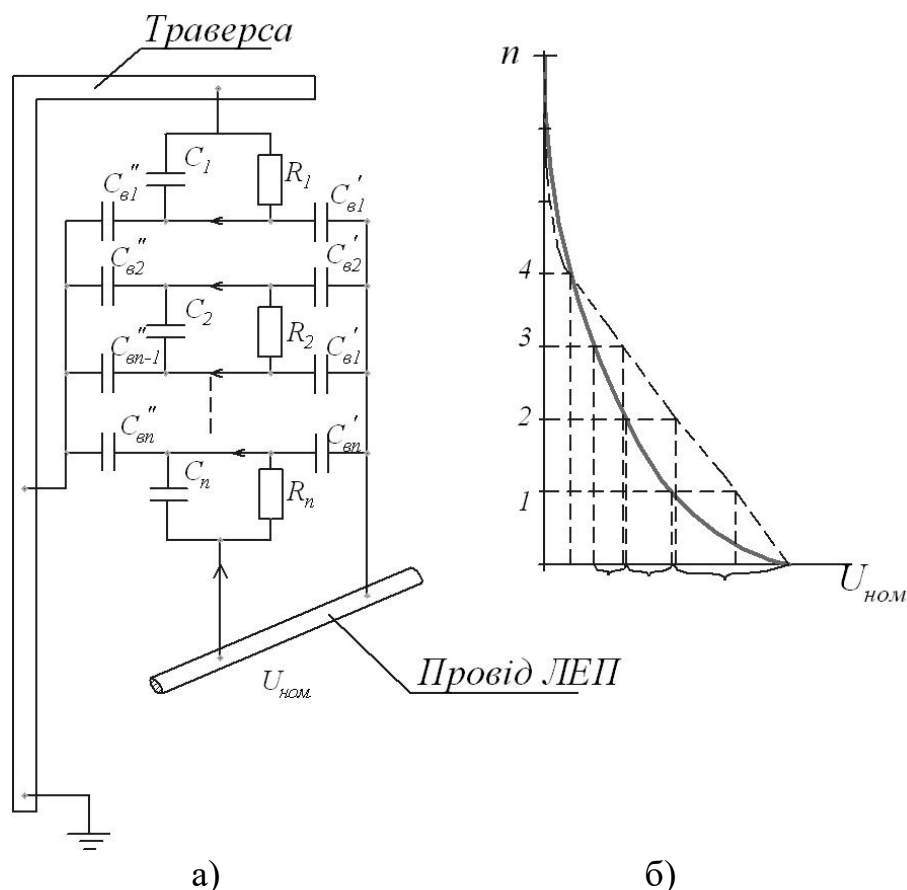


Рис. 1.15 - Гірлянда ізоляторів лінії електропередач:
 а) - схема заміщення;
 б) - розподіли спаду напруг на ізоляторах
 (штрихована лінія – після встановлення екрану)

Такі ізоляційні конструкції при дослідженні електричного поля доцільно представляти схемою заміщення у вигляді періодичних ємнісно-активних ланок по кількості n штук окремих ізоляторів, що складаються з ємностей C_i елементів основної конструкції з врахуванням їх провідностей опорами R_i , ємностей C''_i між проміжними електродами 1, 2, ..., n гірлянди та заземленим електродом (траверсою), а також ємностей C'_i між проміжними електродами 1, 2, ..., n гірлянди та електродом, що знаходиться під напругою (лінійним електродом - проводом ЛЕП).

Ємнісно–активна ланка є досить інформативною схемою заміщення при дослідженні електричних полів в підвісних чи опорних ізоляторах ЛЕП, в обвитках трансформаторів, прохідних ізоляторах та інших елементах ізоляційних конструкцій.

Якщо до лінійного електроду прикладена змінна напруга, то через основну ємнісно–активну ланку $C_i - R_i$ протікає змінний струм витоку ізоляції. При відсутності ємностей C_i' й C_i'' та рівних ємностях C_i спади напруг на елементах конструкції будуть рівними, як і їх розподіл вздовж ізоляційної конструкції.

При наявності ємностей C_i'' ($C_i' = 0$) від кожного проміжного електроду витікає струм на землю, в результаті чого струми через ємності C_i зменшуються у міру віддалення від лінійного електроду. У відповідності з цим розподіл спадів напруг Δu_i ємнісних елементах основної ланки буде таким: $\Delta u_n \geq \Delta u_{n-1} \geq \dots \Delta u_2 \geq \Delta u_1$ (див. рис. 1.15 а)). Ніж більші ємності C_i'' , то більший витік струмів та менш круто підіймається крива розподілу напруг (див. рис. 1.15 б)). Максимальний спад напруги Δu_n припадає на найближчий до лінійного електроду елемент.

При наявності ємностей C_i' через них від лінійного електроду витікає струм до проміжних електродів елементів гірлянди ізоляторів, внаслідок чого відбувається часткова компенсація струму, що витікає ємностями C_i'' на землю. Крива розподілу спадів напруг елементів поблизу лінійного електроду вирівнюється, але незначно. Це зумовлено тим, що ємність C_n'' перебуває під значно вищим потенціалом відносно землі, ніж ємність C_n' (враховується спад напруги на елементі n). Як наслідок, витік ємнісного струму на землю перевищує притік ємнісного струму від лінійного електроду. Це ж стосується й інших найближчих до лінійного елемента ємностей. Звідси витікає, що для ефективної компенсації витоку струмів, тобто для вирівнювання кривої розподілу напруг, ємності C_i' поблизу лінійного електроду повинні бути значно більшими ємностей C_i'' .

Застосуванням спеціальних електродів - екранів, що електрично приєднані до лінійного електроду, отримують таке збільшення ємності C_n'' , при якому крива розподілу напруг вирівнюється (див. рис. 1.15 б) - штрихована лінія). Наприклад, для збільшення ємності між проводом високовольтної повітряної ЛЕП і першим підвісним ізолятором розміщують екран у вигляді порожнистого «човника», зорієнтованого вздовж проводу).

1.13.2 Градування ізоляції

Градування ізоляції – це *вирівнювання* електричного поля шляхом розміщення діелектриків з більшою діелектричною проникністю у місцях підвищеної напруженості електричного поля. Широко застосовується градування в кабелях високої напруги (зменшення напруженості поля біля струмопровідного стержня).

Так, найкраще градування електричної ізоляції одержимо при такому підборі електроізоляційних матеріалів з діелектричними проникностями $\varepsilon = \varepsilon_r$, якщо напруженість електричного поля залишиться *постійною* у всіх шарах електродної системи з циліндричною еквіпотенціальною поверхнею (див. рис. 1.16).

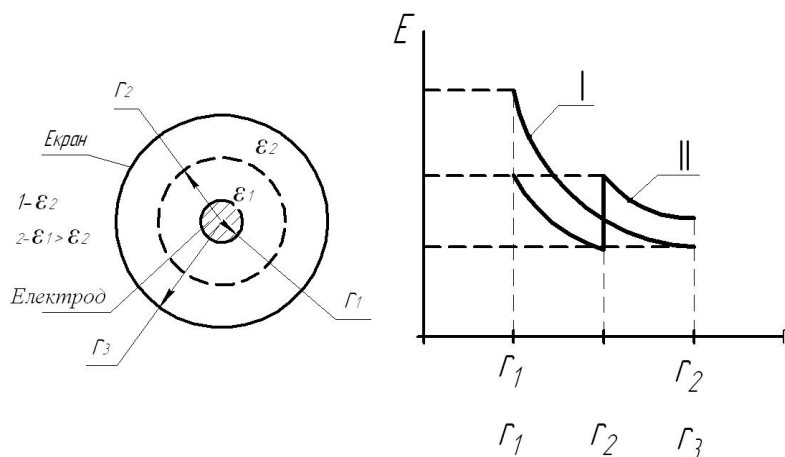


Рис. 1.16 - Градування ізоляції кабеля:

I - напруженість поля у неградованій ізоляції;

II - напруженість поля у градованій ізоляції

Згідно електростатичної теореми Гауса потік \vec{N} вектора електричного зміщення \vec{D} через довільну поверхню S рівний

$$\oint_S \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot E \, dS = q, \quad (1.49)$$

де q - заряд внутрішнього електроду у двоелектродній системі.

Якщо $q = const$ постійна величина, то умова найкращого градування ізоляції ($E_r = const$) матиме вигляд:

$$\oint_S \varepsilon_r \, dS = q. \quad (1.50)$$

При *ізотропному* діелектрику та умові, що діелектрична проникність вздовж *еквіпотенціальної* поверхні не змінюється, одержимо:

$$\varepsilon_r \cdot \oint_S dS = const. \quad (1.51)$$

Таким чином, умова найкращого градування електричної ізоляції ($E_r = const$) виконується тоді, коли добуток діелектричної проникності на площу еквіпотенціальної поверхні залишається незмінним. Співвідношення (1.51) справедливе для будь-якої конфігурації електричного поля.

Справді, оскільки площа еквіпотенціальної поверхні сферичного конденсатора рівна $\oint_S dS = 4\pi \cdot r^2$, то умова *постійності* напруженості електричного поля матиме вигляд:

$$\varepsilon_r \cdot r^2 = const. \quad (1.52)$$

Аналогічно, в циліндричному конденсаторі, площа еквіпотенціальної

поверхні якого рівна $\oint_S dS = 2\pi \cdot r \cdot l$, при постійній довжині l умова найкращого градування запишеться у вигляді:

$$\varepsilon_r \cdot r = \text{const} . \quad (1.53)$$

Однак, важко підібрати електроізоляційні матеріали, щоб їх діелектрична проникність *плавно* змінювалась в широкому діапазоні. Наприклад, якщо радіус струмопровідної жили в кабелі рівний 5 мм, а зовнішній – 15 мм, то для одержання постійної напруженості електричного поля в його ізоляції необхідно мати набір електроізоляційних матеріалів, які забезпечили б плавну зміну діелектричної проникності в 3 рази – таку ізоляцію важко виготовити.

В кабелях та інших електроізоляційних конструкціях широко застосовується ізоляція з певною кількістю шарів окремих матеріалів - багат шарова ізоляція, для формування якої використовують, наприклад, полівінілхлорид, поліетилентерефталат, поліетилен, поліетилен зшитий (див. рис. 1.17).

Максимальна напруженість електричного поля в i -тому шарі ізоляції кабелю (багат шаровий конденсатор з циліндричною екіпотенціальною поверхнею) рівна:

$$E_i = \frac{q_l}{2\pi \cdot \varepsilon_i \cdot \varepsilon_0 \cdot r_i} , \quad (1.54)$$

де r_i та r_{i+1} - внутрішній та зовнішній радіуси i -того шару ізоляції.

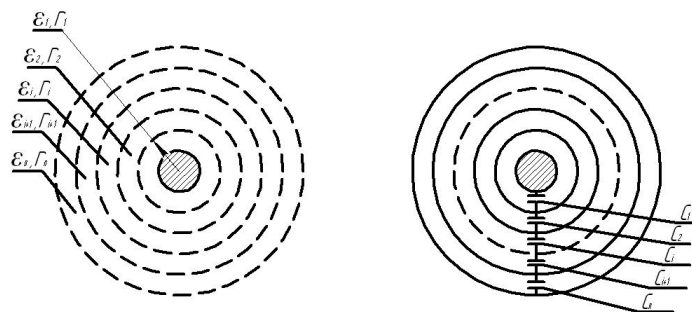


Рис. 1.17 - Кабель з багат шаровою ізоляцією та його ємнісна схема заміщення

Різницю потенціалів в i -тому шарі знаходимо з наступного співвідношення ($\Delta\varphi_i \leq 0$):

$$\Delta\varphi_i = \int_{r_i}^{r_{i+1}} E_i dr = \int_{r_i}^{r_{i+1}} \frac{q_l}{2\pi \cdot \varepsilon_i \cdot \varepsilon_0} \frac{dr}{r} = \frac{q_l}{2\pi \cdot \varepsilon_i \cdot \varepsilon_0} \cdot \ln \frac{r_{i+1}}{r_i} . \quad (1.55)$$

Помноживши у виразі (1.55) чисельник і знаменник на r_i , отримаємо:

$$\Delta\varphi_i = E_i \cdot r_i \cdot \ln \frac{r_{i+1}}{r_i} ,$$

звідки сумарна різниця потенціалів на електричній ізоляції буде рівна:

$$U = \sum_{i=1}^n \Delta\varphi_i = \sum_{i=1}^n E_i \cdot r_i \cdot \ln \frac{r_{i+1}}{r_i} , \quad (1.56)$$

де n – кількість шарів ізоляції.

З іншого боку, на границі розділу двох діелектричних середовищ електричне зміщення D залишається *постійним*, а напруженість поля змінюється скачкоподібно. Для розглядуваної ізоляційної конструкції з *циліндричною* екіпотенціальною поверхнею на границі розділу i -того та $i+1$ -го шарів (див. 1.8):

$$D = \varepsilon_i \cdot \varepsilon_0 \cdot E_i = \varepsilon_{i+1} \cdot \varepsilon_0 \cdot E_{i+1}.$$

Помноживши у цьому виразі праву і ліву частини на r_i та r_{i+1} , відповідно, з врахуванням того, що $r_i \approx r_{i+1}$ після взаємного скорочення постійних величин матимемо:

$$\varepsilon_i \cdot r_i \cdot E_i = \varepsilon_{i+1} \cdot r_{i+1} \cdot E_{i+1}$$

або

$$E_{i+1} = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{i+1}} \cdot \frac{r_i}{r_{i+1}} \cdot E_i. \quad (1.57)$$

Рухаючись у виразі (1.57) від першого шару, напруженість електричного поля i -того шару через напруженість поля першого шару одержимо згідно виразу:

$$E_i = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_i} \cdot \frac{r_1}{r_i} \cdot E_1. \quad (1.58)$$

Підставляючи E_i з останнього виразу у (1.56), після перетворень матимемо:

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_i} \cdot \frac{r_1}{r_i} \cdot E_1 \cdot r_i \cdot \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}$$

або

$$E_1 = \frac{U}{\varepsilon_1 \cdot r_1 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{\varepsilon_i} \cdot \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}}. \quad (1.59)$$

Звідси можна отримати максимальну напруженість електричного поля в будь-якому діелектричному шарі (див. (1.58)):

$$E_i = \frac{U}{\varepsilon_i \cdot r_i \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{\varepsilon_i} \cdot \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}}. \quad (1.60)$$

Метою розрахунку ізоляції методом *багат шарового* градування є отримання однакових максимальних напруженостей поля у всіх шарах. Ця умова буде виконуватись, якщо

$$r_i \cdot \varepsilon_i = const. \quad (1.61)$$

Згідно (1.60) можна розрахувати *радіуси* шарів при відомих діелектричних проникностях відібраних матеріалів.

Приклад

Умова:

При намотуванні плівкового циліндричного конденсатора між шарами утворився тонкий повітряний проміжок (включення).

Радіуси електродів: $r_1 = 2,0 \text{ см}$; $r_2 = 5,0 \text{ см}$. Радіус розміщення включення $r_n = 3,5 \text{ см}$. Діелектрична проникність матеріалу конденсатора $\varepsilon_1 = 3,6$. Конденсатор розрахований на номінальну напругу $U_{\text{ном}} = 35 \text{ кВ}$.

Формули для розв'язування:

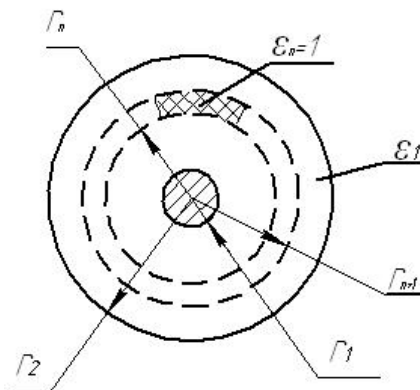
$$E_i = \frac{U}{\varepsilon_i \cdot r_i \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{\varepsilon_i} \cdot \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}};$$

$$E_r \cdot \varepsilon_r \cdot r = \text{const}.$$

Запитання:

Визначити напруженість електричного поля E_n в повітряному включенні.

Рисунок:



Пояснення:

Коефіцієнт отримання максимального значення напруги для даного номіналу електроустановки рівний 1,15.

Для тонкого повітряного прошарку, розміщеного в площині циліндричної екіпотенціальної поверхні, справедливий вираз $E_{i+1} = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{i+1}} \cdot \frac{r_i}{r_{i+1}} \cdot E_i$ з умовою, що $(r_{n+1} \approx r_n)$.

Розв'язання:

Амплітудне значення прикладеної фазної напруги рівне

$$U_{\phi, \text{макс}} = 35 \cdot 1,15 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 32,86 \text{ [кВ]}.$$

Напруженість електричного поля в однорідному середовищі ізолятора у місці розташування прошарку ($\varepsilon = \varepsilon_1$) визначимо з використанням виразу:

$$E_i = E_{r_n} = \frac{U_{\phi, \text{макс}}}{\varepsilon_i \cdot r_i \cdot \sum_{i=1}^{n=3} \frac{1}{\varepsilon_i} \cdot \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}} = \frac{U_{\phi, \text{макс}}}{\varepsilon_1 \cdot r_n \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \cdot \ln \frac{r_n}{r_1} + \frac{1}{\varepsilon_1} \cdot \ln \frac{r_{n+1}}{r_n} + \frac{1}{\varepsilon_1} \cdot \ln \frac{r_2}{r_{n+1}} + \right)}$$

$$= \ll r_{n+1} \approx r_n \gg \approx \frac{U_{\Phi_{\max}}}{\varepsilon_1 \cdot r_n \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_n \cdot r_2}{r_1 \cdot r_{n+1}} \right)} = \frac{U_{\Phi_{\max}}}{r_n \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{32,86}{3,5 \cdot \ln \frac{5,0}{2,0}} = 10,24 \left[\text{кВ} \cdot \text{см}^{-1} \right].$$

Напруженість електричного поля у повітряному прошарку:

$$E_{r_{n+1}} = E_n = E_{r_n} \cdot \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_{n+1}} \cdot \frac{r_n}{r_{n+1}} \approx E_{r_n} \cdot \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_n} = 10,24 \cdot \frac{3,6}{1} = 36,9 \left[\text{кВ} \cdot \text{см}^{-1} \right].$$

Відповідь:

Напруженість електричного поля у повітряному включенні $E_n = 36,9 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$.
Така величина напруженості поля є достатньою для виникнення ударної іонізації у даному дефекті.

Підсумок

Роботоздатність електричної ізоляції підвищується *вирівнюванням* (регулюванням) електричного поля в конструкції. Практично, здійснюють вирівнювання двома способами: змінюючи *активну провідність* або змінюючи *ємність* окремих ділянок ізоляції.

Вирівнювання електричного поля в повітряних ЛЕП здійснюють для перших ізоляторів, що знаходяться під високою напругою, методом розміщення додаткових елементів, які *підвищують ємність* проводу ЛЕП. При цьому відбувається перерозподіл у бік зменшення падіння напруг на цих елементах гірлянди ізоляторів.

Градування ізоляції – це *вирівнювання* електричного поля шляхом розміщення діелектриків з більшою діелектричною проникністю у місцях підвищеної напруженості електричного поля.

Умова найкращого *градування* електричної ізоляції ($E_r = \text{const}$) виконується тоді, коли добуток діелектричної проникності на площу еквіпотенціальної поверхні залишається незмінним.

Для *сферичного* конденсатора умова постійності напруженості електричного поля матиме вигляд: $\varepsilon_r \cdot r^2 = \text{const}$; для *циліндричного* конденсатора - $\varepsilon_r \cdot r = \text{const}$.

Для *багатшарового циліндричного* конденсатора (аналог кабеля), виходячи з умови найкращого градування його ізоляції, отримані вирази напруженості електричного поля i -того шару через напруженість поля першого шару, розраховану з врахуванням спаду напруги на ізоляції.

Запитання

Якими способами здійснюють вирівнювання (регулювання) електричного поля в ізоляційних конструкціях? Поясніть фізичну суть кожного з цих способів.

Чи є негативні наслідки при вирівнюванні (регулюванні) електричного поля в ізоляційних конструкціях? Поясніть фізичну суть.

Яким чином здійснюють вирівнювання (регулювання) електричного поля в різного типу ізоляційних конструкціях?

До якого із способів належить застосування: коронуючих електродів; півпровідних покриттів; екранів на зовнішній ізоляції ЛЕП; конденсаторних обкладинок введів напруги на трансформаторних підстанціях?

Дайте визначення та назвіть об'єкти застосування методу градування ізоляції конструкцій.

Яким чином необхідно розташовувати діелектрики для вирівнювання електричного поля в ізоляційній конструкції?

Дайте визначення діелектричної проникності та назвіть процеси в діелектриках, які розкривають фізичну суть цього визначення.

ЛЕКЦІЯ №7

1.13 Методи регулювання електричних полів
(продовження)

1.13.3 Регулювання електричного поля конденсаторними обкладинками

Для вирівнювання електричних полів у прохідних ізоляторах та кінцевих кабельних муфтах застосовують т. з. конденсаторні обкладинки, які представляють собою додаткові електроди з металічної фольги, розміщені у товщі ізоляції між головними електродами. Внаслідок цього утворюється ланцюг *поєднано з'єднаних* конденсаторів, *ємності* яких при змінній напрузі (або *опори ізоляції* між обкладинками при постійній напрузі) визначають розподіл напруженостей електричного поля в ізоляції.

Шляхом зміни розмірів, кількості та взаємного розміщення обкладинок можна змінювати ємності послідовно «з'єднаних» конденсаторів, регулюючи тим самим характер розподілу напруженості електричного поля. *Остання* від *стержня* обкладинка електрично з'єднується з *фланцем* для надійного заземленого контакту.

Конденсаторні обкладинки можуть розміщуватися:

- в зоні основної ізоляції між електродами для регулювання електричного поля як у радіальному, так і в осьовому напрямках (див. рис. 1.18);
- в зоні між краями електродів для вирівнювання електричного поля між ними.

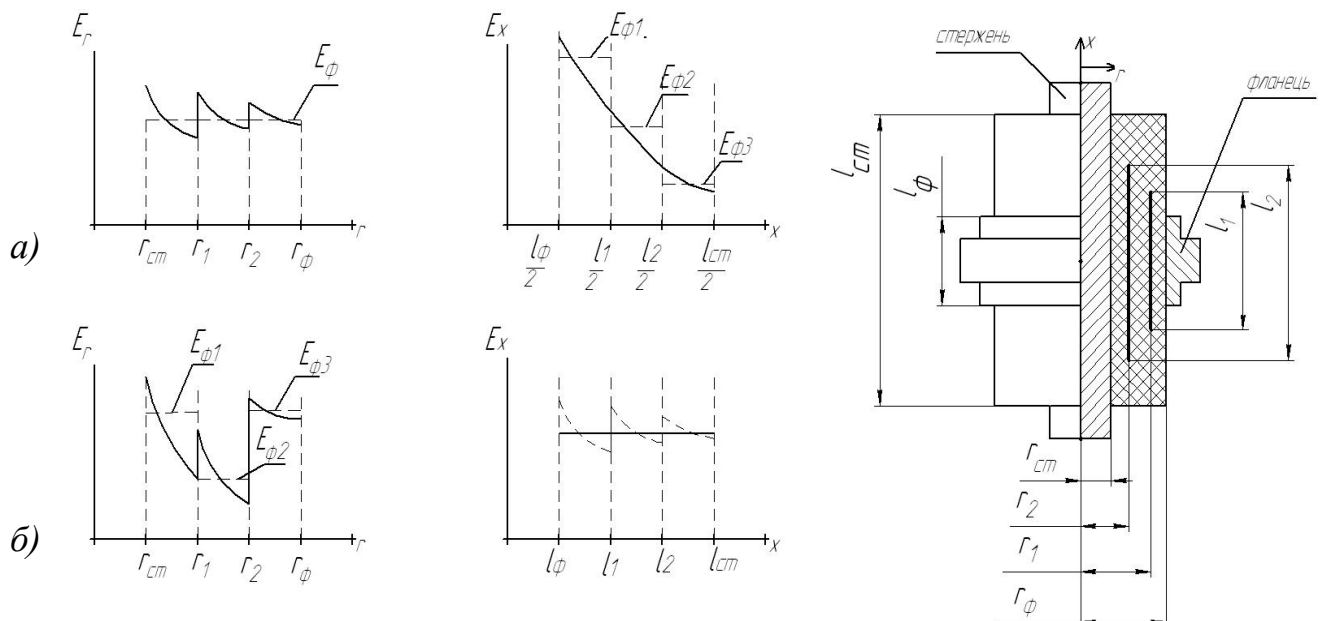


Рис. 1.18 - Діаграми регулювання електричного поля конденсаторними обкладинками в *радіальному а)* та *осьовому б)* напрямках, а також *прохідний ізолятор* з конденсаторними обкладинками (в розрізі)

На рис. 1.19 подана схема розміщення конденсаторних обкладинок у

прохідному ізоляторі. Для одержання основних співвідношень зроблене допущення, що конденсаторні обкладинки зсунені в один бік так, щоб їх кінці з одного боку розмістились у площині, перпендикулярній осі ізолятора.

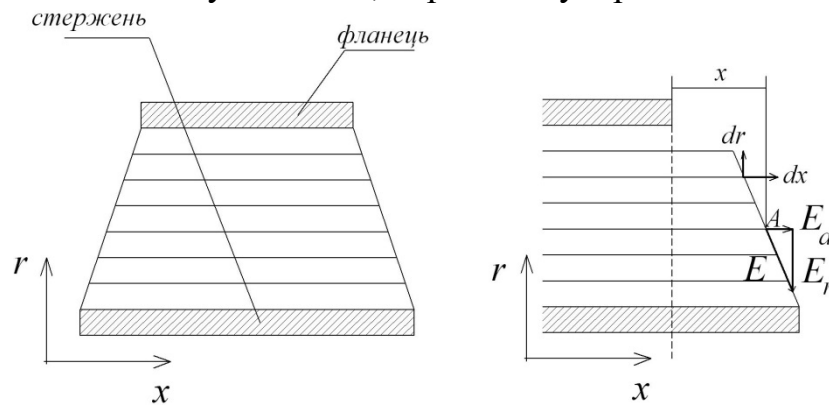


Рис. 1.19 - Розрахункова схема прохідного ізолятора конденсаторного типу

Якщо знехтувати розсіянням електричного потоку, то лінія, яка з'єднує кінці обкладинок на протилежному боці, буде *силовою лінією* електричного поля. Напруженість електричного поля \vec{E} в т. А розкладемо на дві складові:

- радіальну \vec{E}_r , яка співпадає напрямом з радіусом ізолятора;
- аксіальну (осьову) \vec{E}_a , напрямлену вздовж осі ізолятора.

Радіальна складова напруженості електричного поля залишається незмінною по довжині ізолятора при постійному радіусі; аксіальна складова напруженості поля виникає біля кінців обкладинок (всередині ізолятора вона рівна нулю).

Спад напруги (приріст потенціалу) dU на елементі ізолятора при достатньо великій кількості обкладинок знайдемо з виразу:

$$dU = -E_a \cdot (-dx) = -E_r \cdot dr,$$

де E_a - аксіальна складова напруженості електричного поля;

dx - приріст довжини обкладинок (≤ 0);

E_r - радіальна складова напруженості електричного поля;

dr - приріст радіуса обкладинок (≥ 0).

Тут знак «мінус» показує, що вектор \vec{E} направлений у бік зменшення потенціалу dU .

З *електростатичної теореми Гауса* електричний потік від струмопровідного стержня в ізоляторі циліндричного типу, якщо знехтувати його розсіянням, залишається постійним (див. (1.49)), тобто

$$N = \oint_S \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot E \, dS = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot E_r \cdot 2\pi \cdot r \cdot x = q = const,$$

або, враховуючи для спрощення, що ізолятор виготовлений із одного типу матеріалу, одержимо:

$$r \cdot x \cdot E_r = const, \quad (1.63)$$

де r та x - радіус та довжина конденсаторної обкладинки, відповідно.

Конденсаторні обкладинки в ізоляторі в залежності від виконуваних

функцій можуть розташовуватись у двох конструктивних виконаннях, при яких:

– *радіальна складова* напруженості електричного поля E_r постійна;

– *аксіальна складова* напруженості електричного поля E_a постійна.

Розглянемо кожний з цих варіантів.

Варіант 1: $E_r = const$.

З виразу (1.63) випливає, що

$$r \cdot x = C_1 = const; \quad r = \frac{C_1}{x}. \quad (1.64)$$

Аксіальну складову напруженості електричного поля знайдемо з виразу для приросту потенціалу dU та (1.64):

$$E_a = -E_r \cdot \frac{dr}{dx} = -E_r \cdot \left(-\frac{C_1}{x^2} \right) = E_r \cdot \frac{C_1}{x^2}. \quad (1.65)$$

З виразу (1.65) робимо висновок, що аксіальна (осьова) напруженість електричного поля *зростає у квадратичній залежності* із зменшенням довжини конденсаторних обкладинок, тобто **найбільша аксіальна складова напруженості електричного поля буде мати місце біля кріпильного фланця**.

Підставивши E_a з (1.65) у вираз для приросту потенціалу dU , після інтегрування одержимо:

$$dU = E_r \cdot \frac{C_1}{x^2} dx \quad | \int \Rightarrow U = -C_1 \cdot \frac{E_r}{x} + C_2. \quad (1.66)$$

Постійні інтегрування рівняння (1.66) визначимо з граничних умов:

$$x = l_\phi; \quad U = 0; \quad 0 = -C_1 \cdot \frac{E_r}{l_\phi} + C_2; \quad C_2 = C_1 \cdot \frac{E_r}{l_\phi};$$

$$x = l_{cm}; \quad U = U_0; \quad U_0 = -C_1 \cdot \frac{E_r}{l_{cm}} + C_1 \cdot \frac{E_r}{l_\phi} = C_1 \cdot E_r \cdot \left(\frac{1}{l_\phi} - \frac{1}{l_{cm}} \right),$$

де l_ϕ та l_{cm} - довжини конденсаторних обкладинок біля фланця та стержня, відповідно;

U_0 - номінальна напруга електротехнічної установки.

Підставляємо отримані постійні C_1 та C_2 у рівняння (1.65):

$$E_a = \frac{U_0}{x^2} \cdot \frac{l_\phi \cdot l_{cm}}{(l_{cm} - l_\phi)}. \quad (1.67)$$

Знайдемо вираз для *найбільшої допустимої аксіальної* напруженості електричного поля ($l_\phi = x$):

$$E_{a, \text{дон}} = \frac{U_0}{l_\phi} \cdot \frac{l_{cm}}{(l_{cm} - l_\phi)} = \frac{U_0}{l_\phi} \cdot \frac{1}{1 - \frac{l_\phi}{l_{cm}}}. \quad (1.68)$$

Отже, для зменшення напруженості електричного поля і забезпечення нормальної роботи ізолятора необхідно **збільшувати довжину фланця і струмопровідного стержня одночасно**, тобто довжину ізолятора. Так як *радіальна складова* напруженості електричного поля *постійна*, товщина ізоляції

має невелике значення, а тому її можна зменшити.

Таким чином, виходячи з умови $E_r = const$ розміри ізолятора **по довжині** будуть значними при малих радіальних розмірах.

Варіант 2: $E_a = const$.

Тоді з виразу для приросту потенціалу dU та рівняння (1.63) матимемо:

$$\begin{cases} E_r = -E_a \cdot \frac{dx}{dr} \\ E_r = \frac{const}{r \cdot x} \end{cases}; \quad r \cdot x \cdot \frac{dx}{dr} = C_1 = const; \quad x \cdot dx = C_1 \cdot \frac{1}{r} \cdot dr. \quad (1.69)$$

Розділивши змінні, після інтегрування одержимо *вираз кривої руху* у товщі діелектрика ($x \leftrightarrow r$), який забезпечить *незмінність аксіальної складової напруженості електричного поля*:

$$\frac{x^2}{2} = C_1 \cdot \ln r + C_2. \quad (1.70)$$

Граничні умови для визначення постійних мають вигляд:

$$\begin{aligned} x = l_\phi; \quad r = r_\phi; \quad \frac{l_\phi^2}{2} &= C_1 \cdot \ln r_\phi + C_2; \quad C_2 = \frac{l_\phi^2}{2} - C_1 \cdot \ln r_\phi; \\ x = l_{cm}; \quad r = r_{cm}; \quad \frac{l_{cm}^2}{2} &= C_1 \cdot \ln r_{cm} + \frac{l_\phi^2}{2} - C_1 \cdot \ln r_\phi; \\ C_1 &= -\frac{l_{cm}^2 - l_\phi^2}{2 \cdot \ln \frac{r_\phi}{r_{cm}}}; \quad C_2 = \frac{l_\phi^2}{2} + \frac{l_{cm}^2 - l_\phi^2}{2 \cdot \ln \frac{r_\phi}{r_{cm}}} \cdot \ln r_\phi. \end{aligned} \quad (1.71)$$

Підставляючи постійні інтегрування (1.71) у (1.70), отримаємо **рівняння силової лінії**, яка проходить вздовж **кінців конденсаторних обкладок**:

$$\frac{x^2 - l_\phi^2}{l_{cm}^2 - l_\phi^2} = \frac{\ln \frac{r_\phi}{r}}{\ln \frac{r_\phi}{r_{cm}}}. \quad (1.72)$$

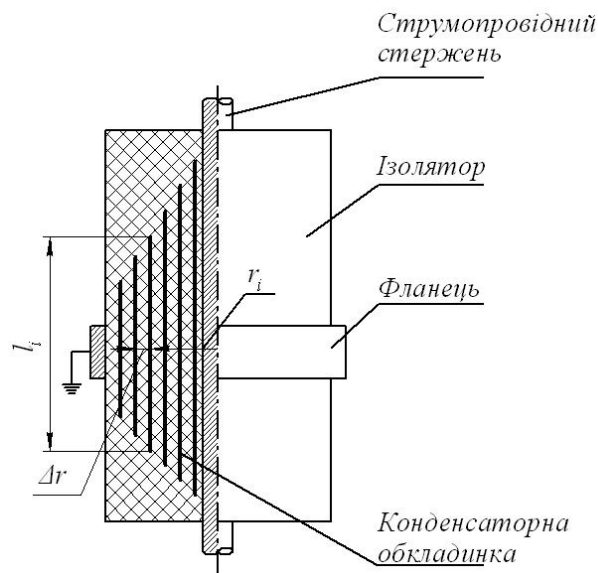


Рис. 1.20 - Схема розміщення конденсаторних обкладинок у товщі прохідного ізолятора

За допомогою рівняння (1.72) проводять розрахунок довжин та **радіусів конденсаторних обкладинок** при постійній складовій аксіальної напруженості електричного поля, як це показано на рис. 1.20.

Величину *радіальної* складової напруженості електричного поля в ізоляційній конструкції з конденсаторними обкладинками знайдемо з виразів для приросту потенціалу dU , (1.69) та (1.71). Справді

$$E_r = -E_a \cdot \frac{dx}{dr} = -E_a \cdot C_1 \cdot \frac{1}{r \cdot x} = E_a \cdot \frac{l_{cm}^2 - l_\phi^2}{2 \cdot \ln \frac{r_\phi}{r_{cm}}} \cdot \frac{1}{r \cdot x}. \quad (1.73)$$

Оскільки *аксіальна* напруженість електричного поля *постійна*, то завдяки *ефекту зсунених конденсаторних обкладинок* матимемо:

$$E_a = \frac{U_0}{l_{cm} - l_\phi}. \quad (1.74)$$

Підставивши значення E_a в (1.73), отримаємо:

$$E_r = \frac{U_0}{2} \cdot \frac{l_{cm} + l_\phi}{2 \cdot \ln \frac{r_\phi}{r_{cm}}} \cdot \frac{1}{r \cdot x}. \quad (1.75)$$

З виразу (1.75) бачимо, що *радіальна* напруженість електричного поля зворотно-пропорційна добутку $r \cdot x$. *Найбільше* значення E_r має місце при *мінімальних* значеннях добутку $r \cdot x$, тобто біля **фланця** ($x = l_\phi; r = r_\phi$) та біля **струмопровідного стержня** ($x = l_{cm}; r = r_{cm}$). На рис. 1.21 показані можливі залежності *радіальної* складової напруженості електричного поля E_r від радіуса розміщення конденсаторної обкладинки r .

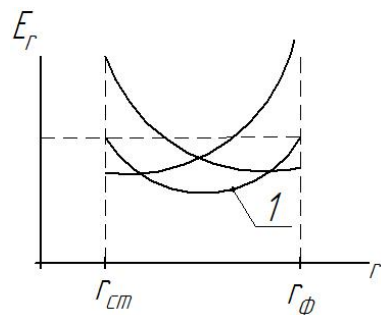


Рис. 1.21 - Залежності E_r від r для різних конструкцій ізоляторів

Очевидно, що найбільш прийнятним випадком є *залежність 1* при якому радіальні складові напруженості поля біля фланця й стержня *рівні*, тобто $E_{r_{cm}} = E_{r_\phi} = E_{r_{макс}}$. **Максимальна радіальна** складова напруженості

електричного поля в цьому випадку буде рівна:

$$E_{r \text{ макс}} = \frac{U_0}{2 \cdot r_{cm} \cdot l_{cm}} \cdot \frac{l_{cm} + l_{\phi}}{\ln \frac{r_{\phi}}{r_{cm}}} = \frac{U_0}{2 \cdot r_{\phi} \cdot l_{\phi}} \cdot \frac{l_{cm} + l_{\phi}}{\ln \frac{r_{\phi}}{r_{cm}}}. \quad (1.76)$$

Для спрощення подальших викладок прийємо таку пропорційну залежність:

$$z = \frac{l_{cm}}{l_{\phi}} = \frac{r_{\phi}}{r_{cm}}. \quad (1.77)$$

Тоді

$$E_{r \text{ макс}} = \frac{U_0}{2 \cdot r_{cm}} \cdot \frac{1+z}{z \cdot \ln z} = \frac{U_0}{2 \cdot r_{\phi}} \cdot \frac{1+z}{\ln z}. \quad (1.78)$$

Визначимо значення z , при якому максимальна радіальна складова напруженості поля матиме мінімальне значення. Для цього прирівняємо до нуля похідну $E_{r \text{ макс}}$ по z :

$$\frac{\partial E_{r \text{ макс}}}{\partial z} = \frac{\ln z - \left(\frac{1}{z} + 1 \right)}{(\ln z)^2} = 0.$$

Так як z є реальним числом і не може бути рівним нескінченості, то повинен бути рівним нулю чисельник останнього рівняння, тобто:

$$\ln z - \left(\frac{1}{z} + 1 \right) = 0.$$

Розв'язок останнього виразу представимо графічним методом (див. рис. 1.22).

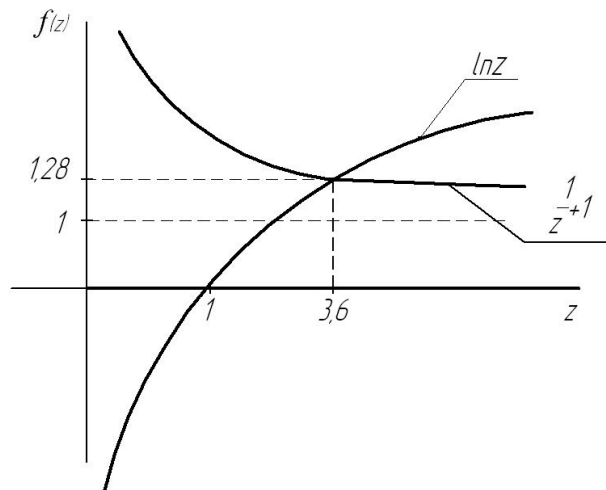


Рис. 1.22 - Графіки залежностей функцій $f(z) = \ln z$ й $f(z) = \frac{1}{z} + 1$

З умови мінімуму максимальної радіальної складової напруженості електричного поля маємо умову конструктивного виконання елементів циліндричного ізолятора (наприклад, прохідного ізолятора ввідного пристрою): $z = 3,6$ (див. (1.77)).

Визначимо геометричні розміри електродів циліндричного ізолятора, тобто

їх відносну величину z , виходячи з умови **мінімуму об'єму** активних ізоляційних матеріалів. Запишемо наближений вираз для об'єму $V_{із}$ електроізоляційних матеріалів *циліндричної* конструкції:

$$V_{із} = \pi \cdot (r_{\phi}^2 - r_{cm}^2) \cdot l_{cm} = \pi \cdot r_{\phi}^2 \left(\frac{z^2 - 1}{z^2} \right) \cdot l_{cm}.$$

Підставивши r_{ϕ} з (1.78) й l_{cm} з (1.74), після перетворень одержимо:

$$V_{із} = \pi \cdot \frac{U_0^2}{4 \cdot E_{r_{макс}}^2} \cdot \frac{(1+z)^2}{(\ln z)^2} \cdot \frac{z^2 - 1}{z^2} \cdot \left(l_{\phi} + \frac{U_0}{E_a} \right) = \pi \cdot \frac{U_0^3}{4 \cdot E_a \cdot E_{r_{макс}}^2} \cdot \frac{(1+z)^3}{z \cdot (\ln z)^2}. \quad (1.79)$$

Слід зазначити, що *максимальні аксіальні* (осьові) та *радіальні* значення складових напруженості електричного поля визначаються **характеристиками матеріалів**, що застосовуються (діелектрична проникність, пористість, «крайовий» ефект та інші місцеві концентрації напруженості електричного поля) й не залежать від z (основних конструктивних розмірів ізолятора).

Прирівнюючи похідну від об'єму $V_{із}$ по z до нуля, будемо мати:

$$\frac{\partial V_{із}}{\partial z} = \frac{(2z-1) \cdot \ln z - 2(z+1)}{z^2 (\ln z)^3} = 0, \quad (1.80)$$

звідки, прирівнявши чисельник до нуля, знайдемо, що $z = 4,1$. Як правило, при розрахунку ізоляційної конструкції *циліндричного типу*, виходячи з *мінімуму об'єму* використуваних електроізоляційних матеріалів, приймають $z = 3,6 \dots 5,0$.

Досліджуючи вираз (1.79), можемо бачити, що при постійних z , E_a та $E_{r_{макс}}$ **об'єм** ізоляційної конструкції в $[см^3]$ пропорційний **кубу номінальної напруги** електроустановки $[кВ^3]$, діючої на ізоляцію. Така пропорційність наближено дотримується для більшості електроізоляційних конструкцій.

1.13.4 Регулювання електричного поля півпровідним покриттям

Застосування *півпровідних* (не повністю провідних) ізоляційних покриттів підвищує напругу виникнення поверхневих розрядів внаслідок пониження найбільшої напруженості електричного поля вздовж *границі розділу* двох середовищ. Півпровідні ізоляційні покриття, маючи дещо більшу власну провідність у порівнянні з матеріалом ізоляційної конструкції, підвищують температуру ізоляції внаслідок збільшення струму витоку через них, що сприяє підсушуванню її поверхні й збільшенню розрядних характеристик у вологій та забрудненій атмосфері.

Півпровідні покриття застосовують у підвісних й прохідних ізоляторах, ізоляції електричних машин та інших електроізоляційних конструкціях. Наприклад, при вирівнюванні електричного поля у *прохідних ізоляторах* з суцільним твердим діелектриком півпровідне ізоляційне покриття найбільш часто наноситься біля середнього **фланця** кріплення ізолятора.

Розглянемо елемент електроізоляційної конструкції *циліндричного типу* (див. рис. 1.23), у якому за допомогою **півпровідного покриття** досягається

зменшення складових напруженості електричного поля E_x , направлених вздовж поверхні твердої ізоляції.

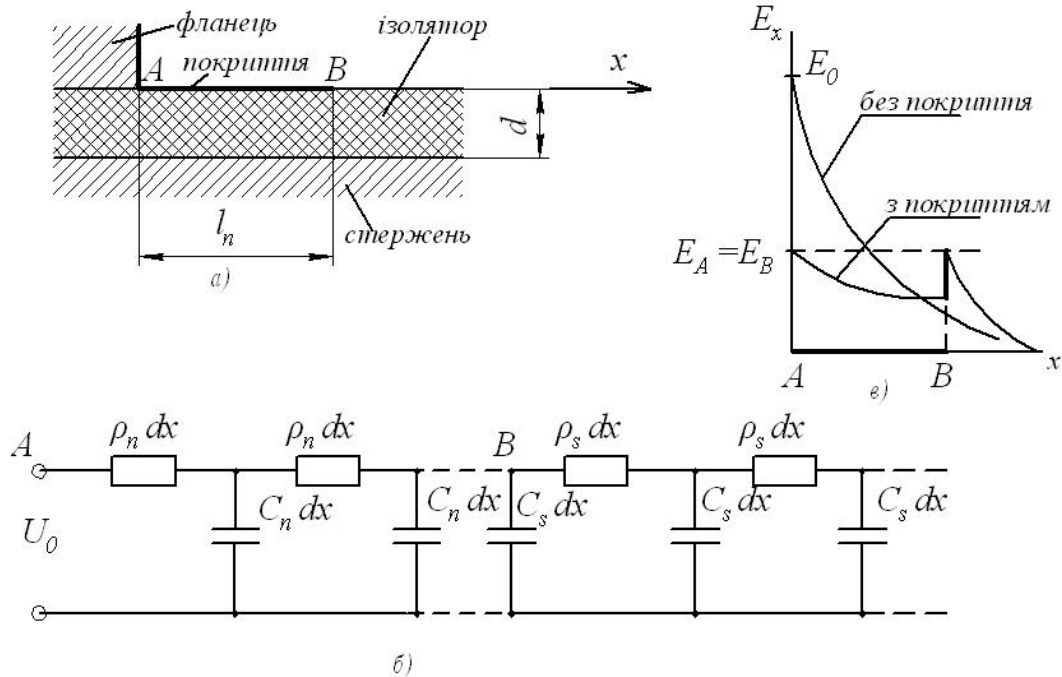


Рис. 1.23 - Регулювання електричного поля ізоляційної конструкції циліндричного типу за допомогою півпровідного покриття:
 а) конструкція ізоляції (на ділянці $A-B$ нанесене півпровідне покриття);
 б) схема заміщення ізолятора з покриттям;
 в) зміна напруженості електричного поля E_x вздовж поверхні твердої ізоляції

При **відсутності покриття** зміна потенціалу та напруженості електричного поля E_x вздовж поверхні твердої ізоляції від фланця визначається, головним чином, питомим поверхневим опором ρ_s й питомою поверхневою ємністю $C_n = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{d} [\Phi \cdot \text{м}^{-2}]$, де ε та d - діелектрична проникність й товщина твердої ізоляції, відповідно. Тому, напруженість електричного поля E_x може бути визначена за допомогою схеми заміщення, представленої на рис. 1.23 б) (при довжині покриття $l_n = 0$ - без покриття). Найбільше значення напруженості електричного поля має у **т. А**:

$$E_{A_0} = U_0 \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \rho_s \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{d^2}} [\text{кВ} \cdot \text{м}^{-1}], \quad (1.81)$$

де U_0 - номінальна напруга електроенергетичної установки, кВ;
 $\omega = 2\pi \cdot f \approx 314$ - робоча кругова частота установки, с^{-1} .

При наявності півпровідного покриття з питомим поверхневим опором $\rho_n < \rho_s$ напруженість електричного поля у **т. А** зменшиться в $\sqrt{\rho_s / \rho_n}$ разів і визначатиметься з виразу:

$$E_{A_n} \approx U_0 \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \rho_n \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{d^2}} [\text{кВ} \cdot \text{м}^{-1}]. \quad (1.82)$$

Кінець покриття утворює *гострий край*, а тому на ділянці $x \geq l_n$ напруженість електричного поля E_x збільшується. У *т. В* вона рівна:

$$E_B = U_B \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \rho_s \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{d^2}} \left[\text{кВ} \cdot \text{м}^{-1} \right], \quad (1.81)$$

де $U_B \approx 2 \cdot U_0 \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega \cdot \rho_n \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{d^2}} \cdot l_n\right)$ - спад напруги на ізоляції з покриттям при $x = l_n, \text{кВ}$.

Внаслідок падіння напруги у півпровідному ізоляційному покритті $U_B < U_0$, а тому напруженість електричного поля з покриттям менша від такої без нього: $E_B < E_{A0}$.

Питомий опір ρ_n та довжину l_n півпровідного покриття можна підібрати такими, щоб $E_{AII} \cong E_B \leq E_{\text{дон}}$, де $E_{\text{дон}}$ - допустима напруженість електричного поля, яка відповідає відсутності розрядів вздовж поверхні твердої ізоляції в умовах дії номінальної напруги U_0 . Для цього, як витікає з (1.82) й (1.83), повинні виконуватися такі умови:

$$\begin{aligned} \rho_n &\leq \frac{E_{\text{дон}}^2 \cdot d^2}{U_0^2 \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \left[\frac{\text{Ом} \cdot \text{м}^2}{\text{м}} \right]. \\ l_n &\geq \sqrt{\frac{2 \cdot d^2}{\omega \cdot \rho_n \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}} \cdot \ln \frac{2 \cdot U_0}{E_{\text{дон}}} \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \rho_s \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{d^2}} \left[\text{м} \right]. \end{aligned} \quad (1.84)$$

Графіки зміни напруженості електричного поля E_x вздовж поверхні твердої ізоляції при *відсутності* і *наявності півпровідного покриття* показані на рис. 1.23, в).

Підсумок

Для вирівнювання електричних полів у прохідних ізоляторах та кінцевих кабельних муфтах застосовують т. з. конденсаторні обкладинки, які представляють собою додаткові електроди з металічної фольги, розміщені у товщі ізоляції між головними електродними.

Конденсаторні обкладинки можуть розміщуватися:

- в зоні основної ізоляції між електродними для регулювання електричного поля як у радіальному, так і в осьовому напрямках;
- в зоні між краями електродів для вирівнювання електричного поля між ними.

Радіальна складова напруженості електричного поля залишається незмінною по довжині ізолятора при постійному радіусі; аксіальна складова напруженості поля виникає біля кінців обкладинок.

Конденсаторні обкладинки в ізоляторі в залежності від виконуваних функцій можуть розташовуватись у двох конструктивних виконаннях.

Для зменшення напруженості електричного поля і забезпечення нормальної роботи ізолятора необхідно збільшувати довжину фланця і струмопровідного стержня одночасно, тобто довжину ізолятора.

З умови мінімуму максимальної радіальної складової напруженості електричного поля отримана умова конструктивного виконання елементів циліндричного ізолятора: відношення радіусів фланця до струмопровідного стержня або довжин струмопровідного стержня до фланця рівне 3,6.

Застосування півпровідних (не повністю провідних) ізоляційних покриттів підвищує напругу виникнення поверхневих розрядів.

При вирівнюванні електричного поля у прохідних ізоляторах з суцільним твердим діелектриком півпровідне ізоляційне покриття найбільш часто наноситься біля середнього фланця кріплення ізолятора.

За допомогою півпровідного покриття досягається зменшення складових напруженості електричного поля, направлених вздовж поверхні твердої ізоляції.

Запитання

Якими способами здійснюють вирівнювання (регулювання) електричного поля в ізоляційних конструкціях? Поясніть фізичну суть кожного з цих способів.

Чи є негативні наслідки при вирівнюванні (регулюванні) електричного поля в ізоляційних конструкціях? Поясніть фізичну суть.

Яким чином здійснюють вирівнювання (регулювання) електричного поля в різного типу ізоляційних конструкціях?

Що таке конденсаторні обкладинки і як вони розміщуються в ізоляційній конструкції?

Яким чином досягається регулювання електричного поля конденсаторними обкладинками в ізоляційній конструкції циліндричного типу?

Чому аксіальна складова напруженості поля виникає біля кінців обкладинок, а всередині ізолятора вона рівна нулю?

Який наслідок електростатичної теореми Гауса щодо довжин і радіусів розміщення конденсаторних обкладинок?

У якому місці прохідного ізолятора аксіальна складова напруженості електричного поля буде найбільшою?

Чому ізоляційна конструкція циліндричного типу є видовженою у напрямку струмопровідного стержня?

Яке співвідношення повинні мати конструктивні елементи прохідного ізолятора (струмопровідний стержень у межах ізоляційної конструкції та кріпильний фланець) для забезпечення мінімуму максимальної радіальної складової напруженості електричного поля?

Яке співвідношення повинні мати конструктивні елементи прохідного ізолятора для забезпечення умови мінімуму об'єму активних ізоляційних матеріалів?

Який ефект має застосування півпровідних (не повністю провідних) ізоляційних покриттів? У якому місці ізоляційної конструкції циліндричного типу їх найдоцільніше розміщувати?

У чому суть впливу на електричне поле півпровідного ізоляційного покриття?

ТЕМА 4. ЕЛЕКТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВНУТРІШНЬОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК

ЛЕКЦІЯ №8

[1, с. 124–185; 2, с. 111–142; 6, с. 75–115; 8, с. 214–253; 14; 16]

1.14 Внутрішня ізоляція електроустановок

1.14.1 Ізоляція силових трансформаторів

Ізоляція силових трансформаторів з металевим баком розподіляється на зовнішню і внутрішню. **Зовнішня** ізоляція утворюється повітряними проміжками між введеннями, між введеннями і заземленим баком, а також вздовж поверхні фарфорових покришок введень. До **внутрішньої** ізоляції відносять ізоляційні проміжки усередині баку: ізоляцію обвиток, масляної частини введень, відведень й допоміжних пристроїв.

Ізоляцію обвиток поділяють на *головну* і *поздовжню* як подано на рис. 1.24. *Головна* ізоляція утворюється ізоляцією між обвитками, між обвитками і магнітопроводом, міжфазною ізоляцією між зовнішніми котушками двох сусідніх стрижнів та ізоляцією зовнішньої котушки від стінки баку. До *поздовжньої* ізоляції відносять ізоляційні проміжки між витками, між шарами витків і між котушками однієї обвитки. Габарити головної і поздовжньої ізоляції при номінальній напрузі до 220 кВ включно визначаються грозовими перенапруженнями.

Конструкція ізоляції повинна забезпечувати охолодження активних частин трансформатора.

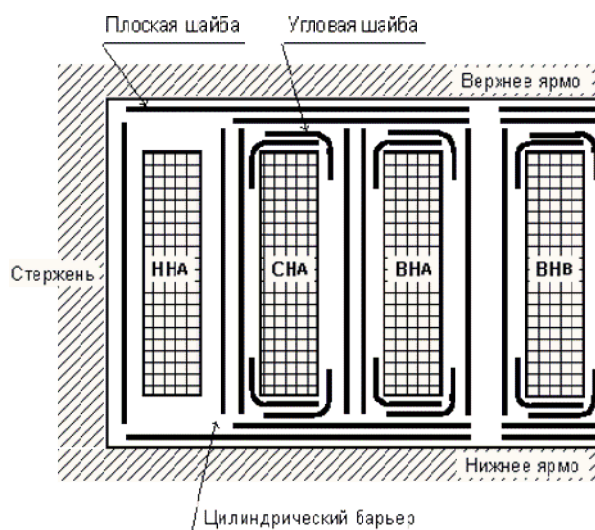


Рис. 1.24 - Загальний вигляд головної ізоляції обвиток трансформаторів

Головна ізоляція виконується переважно оливобар'єрного типу, що зумовлює високу імпульсну електричну міцність і забезпечує інтенсивне

охолодження обмоток й магнітопроводу. Така ізоляція утворюється трансформаторним маслом й бар'єрами з електротехнічного картону. Загальний вигляд ізоляції оливобар'єрного типу показаний на рис. 1.24. Набір бар'єрів складають з трьох основних елементів: циліндричного бар'єру, плоскої шайби й кутової шайби. Бар'єри розділяють один великий масляний проміжок на декілька менших, що збільшує загальну пробивну напругу. Для найбільшого ефекту бар'єри повинні розташовуватися перпендикулярно силовим лініям електричного поля.

Для забезпечення циркуляції оливи і відведення тепла споруджують оливні канали двох основних видів (див. рис. 1.25):

- вертикальні канали між циліндричними бар'єрами та між бар'єрами й обвиткою за допомогою вертикальних рейок;
- горизонтальні канали між витками за допомогою горизонтальних прокладок, які служать одночасно для кріплення вертикальних рейок.

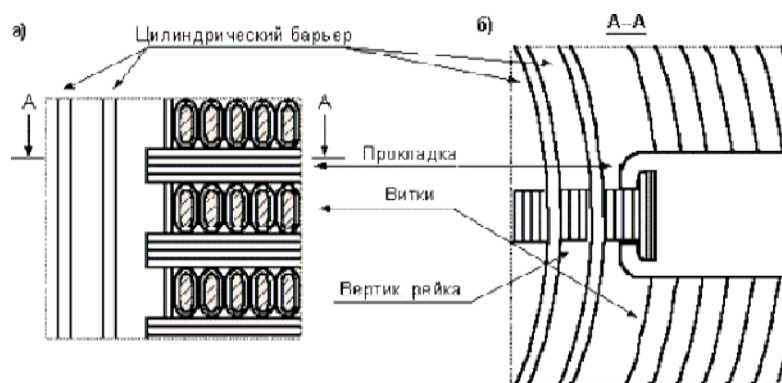


Рис. 1.25 - Вертикальний (а) і горизонтальний (б) перетин оливних каналів

Характерна будова головної ізоляції трансформаторів напругою 35 кВ і 110 кВ показана на рис. 1.26.

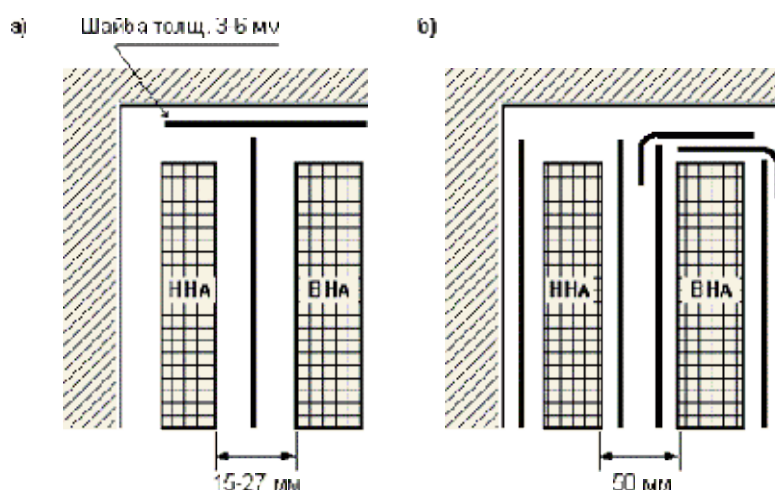


Рис. 1.26 - Головна ізоляція трансформаторів 35 кВ (а) і 110 кВ (б)

У трансформаторах номіналом 220 кВ і вище часто роблять вводи в середину котушки, що приводить до зменшення напруги на краях котушки.

Поздовжня ізоляція силових трансформаторів виконується, зазвичай,

шарами електроізоляційного паперу, що накладається поверх проводу.

В оливобар'єрній ізоляції найбільші електричні навантаження сприймають прошарки оливи, оскільки діелектрична проникність ϵ_k електрокартону складає приблизно 4, а оливи - $\epsilon_o \approx 2,2$; до того ж електрична міцність оливи в 3-4 рази менша електричної міцності просоченого електрокартону. Електричне руйнування оливобар'єрної ізоляції починається з пробою оливного каналу без повного пробою ізоляції. При цьому в місці пробою утворюються незворотні пошкодження електрокартону або паперу, що знижують його електричну міцність. Щоб цього не відбувалося, в оливному каналі робочі напруженості електричного поля підтримують на рівні від 2,5 кВ/мм до 5 кВ/мм в першому оливному каналі, де напруженість поля найбільша.

1.14.2 Ізоляція введів високої напруги

Прохідні ізолятори високої напруги, іншими словами - вводи, мають несприятливе розташування електродів з великою напруженістю електричного поля. Найбільша напруженість електричного поля спостерігається біля краю фланця ізолятора (рис. 1.27), де є значні і нормальна до поверхні ізолятора складова напруженості електричного поля, і тангенціальна складова. У цьому місці можливе виникнення корони, ковзаючих розрядів, що зумовлюють перекриття й радіальні пробої матеріалу ізолятора. Досить часто під час експлуатації з'являються найбільш небезпечні для введів *механічні навантаження на згин* ізолятора. Крім того, на ізолятор впливають *теплові навантаження* внаслідок нагріву струмовідних частин і діелектричних втрат в ізоляційному тілі.

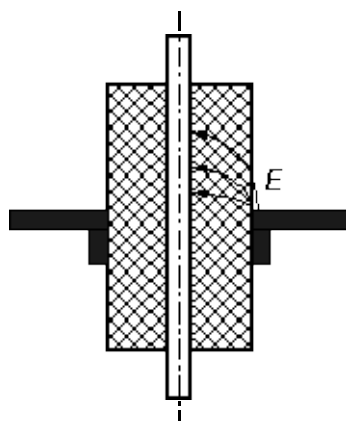


Рис. 1.27 - Електричне поле у прохідному ізоляторі

Для створення більш рівномірного електричного поля використовуються конструкції *конденсаторного типу*, в яких необхідний розподіл напруги вздовж ізоляційної конструкції примусово здійснюється за допомогою металевих обкладинок, що закладаються в ізоляцію в процесі її намотування (виготовлення) (див. рис. 1.28). Така конструкція зменшує необхідні розміри введів, особливо їх діаметр, що покращує умови відведення тепла. Найчастіше ізолятори конденсаторного типу виконуються так, щоб забезпечити *постійність аксіальної* (поздовжньої) складової напруженості електричного поля (див. рис. 1.28). Для

цього товщину шару ізоляції вибирають такою, щоб забезпечити однакові ємності між обкладинками і однакову напругу на кожному шарі; уступи також приймаються однаковими. Іноді, проте, виконують однакову товщину шарів.

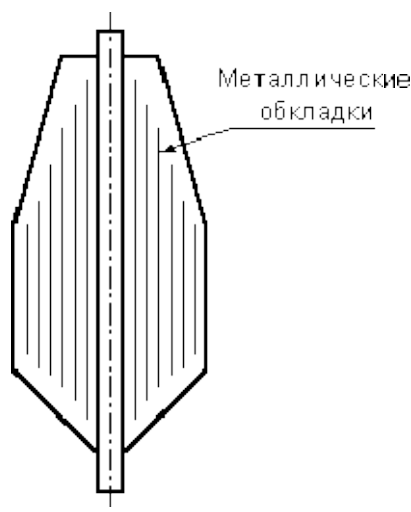


Рис. 1.28 - Прохідний ізолятор конденсаторного типу з металічними циліндричними обкладинками

За *типом* виконання ізоляції прохідні ізолятори діляться на суцільні фарфорові, паперово-бакелітові, оливо-бар'єрні і паперово-оливні (конденсаторного типу).

Для внутрішньої установки на напругу до 35 кВ використовуються фарфорові армовані прохідні ізолятори, усередині яких проходить струмовідний стрижень, або паперово-бакелітові прохідні ізолятори конденсаторного типу. Паперово-бакелітові ізолятори виготовляються шляхом намотування паперу, просоченого бакелітовою смолою, з обкладинками з металеві фольги, обтискуються і витримуються при температурі 160°C , при якій відбувається полімеризація смоли. Недоліками паперово-бакелітових ввідів є мала вологостійкість і наявність газових включень, тому на напругу вище 35 кВ їх не застосовують.

Для напруги 110 кВ і вище використовуються конденсаторні вводи з оливо-бар'єрною або паперово-оливною ізоляцією. У зв'язку з більш простою технологією виготовлення найбільш поширені останні. У цій конструкції на струмоведучий стрижень намотується ізоляція з кабельного паперу, а між шарами паперу закладаються металеві обкладинки з алюмінієвої фольги. Папір висушується під вакуумом і просочується трансформаторною оливою. Зверху конструкція закривається фарфоровими кришками, закріпленими на металевому фланці. Простір усередині кришок заповнюється трансформаторною оливою.

Для підвищення *теплової стійкості* ввідів збільшують площу сечення стрижня і покращують якість ізоляції зниженням тангенса кута діелектричних втрат.

1.14.3 Ізоляція силових конденсаторів

Силові конденсатори застосовують у таких випадках:

- у силових мережах промислової частоти високої і низької напруги частотою 50 Гц (косинусні конденсатори, конденсатори поздовжньої ємнісної компенсації, конденсатори ємнісного відбору потужності);
- у силових установках підвищених частот (електротермічні установки частотою до 10 кГц);
- в установках постійної та пульсуючої напруги;
- в установках імпульсної напруги.

Основна характерна відмінність силових конденсаторів від інших конденсаторів - порівняно *великі струми*, що протікають через них, які навіть при малих діелектричних втратах приводять до помітного нагріву конденсаторів. *Основні проблеми*, що вирішуються при проектуванні і виготовленні конденсаторів, полягають в забезпеченні необхідної ємності, робочої напруги і теплової стійкості. Все це визначається ізоляцією конденсатора: допустимою величиною робочої напруженості електричного поля, діелектричними втратами й умовами тепловідводу.

Силові конденсатори складаються з секцій в основному *рулонного* типу. Секції намотують на циліндричну основу і після зняття з основи плющують або залишають на циліндричному ізоляційному каркасі, отримуючи циліндричну секцію. Залежно від номінальної напруги і ємності конденсатора його секції з'єднуються паралельно, послідовно або змішано (див. рис. 1.29). Пакет вмонтовують у корпус, просочують і герметизують для запобігання попадання повітря й вологи.

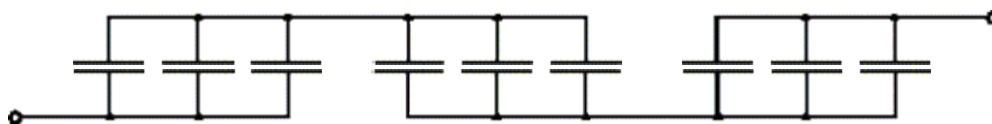


Рис. 1.29 - Змішане паралельно-послідовне з'єднання секцій конденсатора

Секції конденсаторів виконуються або з *прихованою*, або з *виступаючою* фольгою (див. рис. 1.30). Конструкцію з виступаючою фольгою застосовують для поліпшення тепловідводу і для зменшення індуктивності секцій. Для збільшення напруги застосовують конструкцію з т. з. «*сліпою*» проміжною фольгою; при цьому секція складається з декількох підсекцій, сполучених послідовно, а виводи мають тільки перша і остання фольга (рис. 1.30 з)).

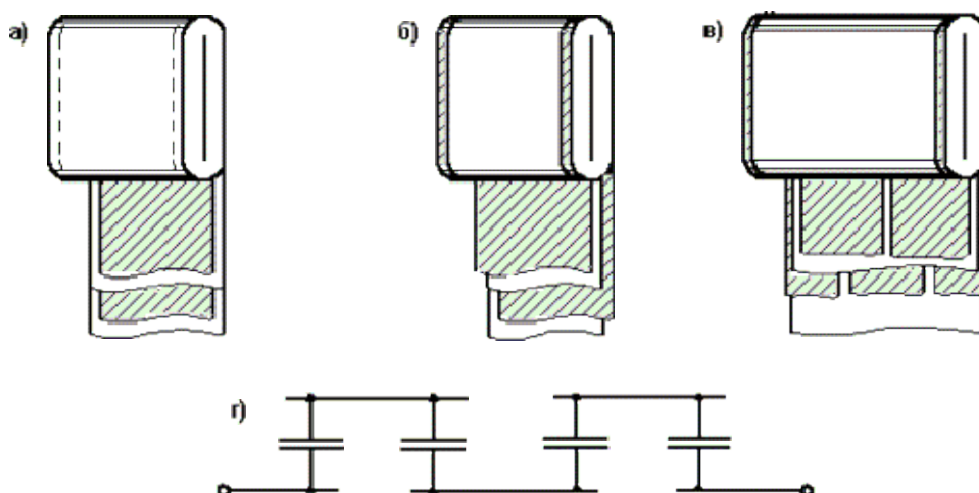


Рис. 1.30 - Рулонні секції конденсаторів з прихованою фольгою (а), з виступаючою фольгою (б) і з проміжною «сліпою» фольгою (в)

Як *ізоляція* використовується просочений конденсаторний папір і полімерні плівки.

Найістотніші характеристики конденсаторного паперу - товщина (коливається від 4 до 30 *мкм*), щільність, кут діелектричних втрат (у просоченого паперу $tg \delta = 0,0012 \dots 0,0026$) і електрична міцність, сильно залежна від матеріалу просочення.

З *полімерних плівок* в конденсаторах промислової і підвищеної частоти застосовують поліпропіленову плівку ($\epsilon_{пл} = 2,25$, $tg \delta = 0,0003$), а в імпульсних конденсаторах - лавсанову (поліетилентерефталатну) плівку ($\epsilon_{пл} = 3,2$, $tg \delta = 0,003$ при частоті 50 Гц і $tg \delta = 0,02$ при частоті 1 МГц). У полімерних плівок висока електрична міцність, достатня термостійкість і механічна міцність, сумісність з рідкими діелектриками, які використовуються для просочення.

Для силових конденсаторів часто застосовують *комбіновану паперово-плівкову ізоляцію*, в якій шари конденсаторного паперу чергуються з шарами полімерної плівки. Папір вбирає рідину, втягуючи її в прошарки між плівками, і забезпечує відсутність газових включень. У такій ізоляції сприятливий розподіл напруженості електричного поля: у плівці напруженість приблизно удвічі більша, ніж у папері, оскільки діелектрична проникність плівки приблизно удвічі менша, а електрична міцність плівки вища.

Як *просочення* використовують нафтову конденсаторну оливу, хлоровані дифеніли та їх замінники, а в імпульсних конденсаторах - касторову оливу. Хлоровані дифеніли мають вищу діелектричну проникність в порівнянні з конденсаторною оливою, високу стійкість до розкладання в електричному полі, негорючість, але токсичні й чутливі до домішок.

Електродами в силових конденсаторах є алюмінієва фольга завтовшки (7 ... 12) *мкм*. У деяких типах конденсаторів використовується шар металу (цинку або алюмінію), нанесений на поверхню стрічки або паперу.

Робочі напруженості електричного поля в ізоляції паперово-оливних

конденсаторів складають $E_{роб} = 12 \dots 14 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$; при просоченні хлордифенилами або їх замінниками напруженості зростають до $E_{роб} = 18 \dots 22 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$, але при цьому можливий неприпустимий нагрів і кут втрат повинен бути малим. Паперово–поліпропіленовий діелектрик з двома листами плівки ($\epsilon_{пл} = 2,25$) і листом паперу ($\epsilon_n = 4,0$) між ними допускає $E_{роб} \geq 18 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$ і вище в паперовому компоненті залежно від просочення і до $E_{роб} = 50 \dots 60 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$ в плівці. Конденсатори з тільки плівковим діелектриком допускають $E_{роб} \leq 50 \dots 60 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$, а в конденсаторах з використанням металізованої поліпропіленової плівки - до $E_{роб} = 70 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$. При підвищених частотах допустимі робочі напруженості поля визначаються в основному тепловим режимом. При постійній нарузі допустима робоча напруженість може досягати $E_{роб} = 80 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$.

1.14.4 Ізоляція силових кабелів

Силові кабелі призначені для передачі і розподілу електричної енергії. Кабель високої напруги складається з таких *складових частин*:

- одна або декілька струмовідних жил;
- ізоляція;
- оболонка з алюмінію або свинцю для герметизації;
- броня із сталевих стрічок чи дроту для захисту від механічних пошкоджень;
- покрив із стрічок кабельного паперу або пряжі, просочені бітумом, для захисту від корозії.

Ізоляція кабелю поділяється на фазну, міжфазну, поясну і оболонкову.

Жили кабелю виготовляють з алюмінію або міді. Кабелі на напругу до 10 кВ включно виготовляються з секторними жилами, а на напругу 20 кВ і вище - з круглими жилами, зазвичай з окремими екранами. Конструкція з секторними жилами забезпечує повніше використання об'єму під металевою оболонкою, а круглі жили з екранами служать для забезпечення рівномірного радіально направлено електричного поля (рис. 1.31).

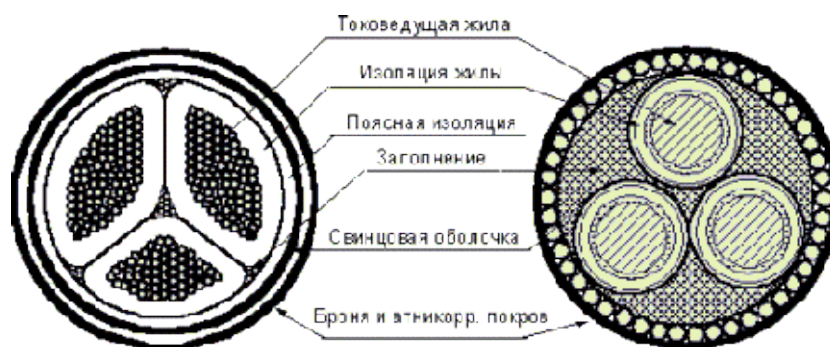


Рис. 1.31 - Трижильні кабелі з в'язким просоченням

Ізоляція виконується або шарами кабельного паперу, просоченого в'язкими оливо-каніфольними компаундами чи кабельними оливами (нафтовими або синтетичними), або з пластмас. Кабельний папір виготовляється товщиною від 80 до 170 мкм. Шари паперу накладають так, щоб прошарки шарів не співпадали. У високовольтних кабелях з пластмасовою ізоляцією переважно використовується поліетилен низької і високої щільності, іноді прошарки ізоляції виконують з фторопласту. Кабелі з пластмасовою ізоляцією виконуються на напругу до 400 кВ.

Кабелі з в'язким просоченням виготовляють на напругу не вище 35 кВ, оскільки при теплових переміщеннях в такій ізоляції утворюються порожнечі, що знижують робочі напруженості електричного поля. У кабелях 110 кВ і вище застосовується паперова ізоляція з менш в'язким просоченням і підтримкою надмірного низького (до 0,5 МПа) або високого тиску оливи. Кабелі високого тиску у ряді випадків виконують в сталевому трубопроводі, кожна жила поверх ізоляції має окремий металевий екран.

1.14.5 Ізоляція електричних машин високої напруги

До електричних машин високої напруги відносяться турбогенератори, гідрогенератори, синхронні компенсатори, синхронні і асинхронні двигуни великої потужності з номінальною напругою 3 кВ і вище. Основною особливістю роботи ізоляції машин є важкі умови експлуатації: дії перенапружень, високої робочої температури і перепадів температури, вібрації, ударних механічних навантажень. З цієї причини ізоляція машин повинна володіти високою нагрівостійкістю (класу не нижче *B*) і механічною міцністю.

У електричних машинах високої напруги *ізоляцію обвиток статорів* розділяють на такі види:

- корпусна або головна ізоляція - між обвиткою і сталлю статора;
- міжфазна ізоляція - між обвитками різних фаз;
- виткова або поздовжня ізоляція - між витками однієї секції або між котушками;
- ізоляція елементарних провідників - між провідниками в одному витку або стрижні обвитки.

Виткова ізоляція виконується, зазвичай, із склослюдяної стрічки або на основі емальованих проводів з скловолокнистою обвиткою, просочених епоксидним компаундом. *Головна ізоляція* виконується на основі слюдяних ізоляційних матеріалів із забезпеченням відсутності газових прошарків. Струмівідна частина стрижнів виконується прямокутної форми, а тому електричне поле в пазах неоднорідне. Для зниження неоднорідності поля кути стрижнів закругляють або застосовують екрани (прокладки) з алюмінію.

Короткочасна електрична міцність *корпусної ізоляції* при товщині від 3-х до 12-и мм характеризується на частоті 50 Гц середньою електричною міцністю (30 ... 35) кВ/мм. Проте, робочі напруженості електричного поля у зв'язку з нестабільністю характеристик вибираються на рівні (2 ... 4) кВ/мм. При робочих напруженостях у високовольтних електричних машинах протягом тривалого часу можливе існування часткових розрядів помітної інтенсивності, які слабо

впливають на надійність і довговічність ізоляції, оскільки слюда вельми стабільна до дії часткових розрядів.

Підсумок

Ізоляція силових трансформаторів поділяється на зовнішню і внутрішню (головну і поздовжню). Головна ізоляція силових трансформаторів найчастіше виконується оливо–бар’єрного типу, а поздовжня ізоляція - шарами електроізоляційного паперу, що накладається поверх дроту.

Прохідні ізолятори високої напруги мають несприятливе розташування електродів, слабку механічну міцність на згин і характеризуються нагрівом ізоляційного тіла ізолятора. Найбільш поширеною конструкцією прохідного ізолятора є конденсаторне.

Від силових конденсаторів потрібне забезпечення необхідної ємкості, робочої напруги і теплової стійкості, що визначається ізоляцією конденсатора. Як ізоляція використовується просочений конденсаторний папір і полімерні плівки. Електродами в силових конденсаторах є алюмінієва фольга.

Ізоляція силових кабелів виконується або шарами кабельного паперу, просоченого в’язкими оливо–каніфольними компаундами або кабельними оливами (нафтовими чи синтетичними), або з пластмас. У кабелях 110 кВ і вище застосовується паперова ізоляція з менш в’язким просоченням і підтримкою надмірного низького або високого тиску оливи.

В електричних машинах високої напруги ізоляцію обвиток статорів розділяють на головну, міжфазну і на поздовжню.

Запитання

Які конструктивні особливості побудови ізоляції силових трансформаторів?

Як виконується ізоляція високовольтних вводів?

Яким чином улаштована ізоляція силових конденсаторів?

Яка конструкція силових кабелів. Як виконана їх ізоляція?

Які особливості виконання ізоляції високовольтних електричних машин?

РОЗДІЛ II ЕЛЕКТРИЧНІ РОЗРЯДИ В ГАЗАХ

ТЕМА 6. ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В ГАЗАХ

ЛЕКЦІЯ №9

[1, с. 16–123; 2, с. 54–63; 3, с. 15–19; 5, с. 12–25; 8, с. 46–69]

2.1 Особливості зовнішньої ізоляції електроустановок високої напруги

Зовнішня ізоляція електроустановок високої напруги - це *ізоляційні проміжки* між електродами (проводами ліній, шинами розподільних пристроїв та ін.), в яких роль основного діелектрика виконує *повітря*.

Доцільність використання діелектричних властивостей повітря в енергетичних установках різних класів напруги пояснюється малою вартістю та простотою створення ізоляції. Для її виконання електроди, що ізолюються, розміщуються на певних відстанях один від іншого й від землі та закріплюються за допомогою ізоляційних конструкцій з твердих діелектриків - *ізоляторів*. При цьому саме ці *повітряні проміжки* та *проміжки у повітрі вздовж поверхонь ізоляторів* утворюють **зовнішню ізоляцію** електроустановок.

Для зовнішньої ізоляції характерна залежність електричної міцності від *метеорологічних умов*, які визначають стан основного діелектрика - повітря, а також стан поверхонь ізоляторів, тобто кількість та властивості *забруднень* на них. Так, на *розрядні напруги* суто повітряних проміжків та проміжків вздовж поверхонь ізоляторів **внутрішньої установки** справляють вплив: *тиск p , температура T та абсолютна вологість H* повітря, а на розрядні напруги ізоляторів **зовнішньої установки**, крім того, - вид та інтенсивність атмосферних *опадів*, кількість та склад *забруднень* в атмосфері, *вітрові умови*.

Повітряні ізоляційні проміжки вибирають такими, щоб вони мали необхідну *електричну міцність* при самих несприятливих поєднаннях *тиску, температури та вологості* повітря. Крім цього, електричну міцність проміжків вздовж поверхонь ізоляторів зовнішньої установки вимірюють в умовах, які відповідають різним механізмам розрядних процесів, а саме, якщо поверхні ізоляторів *чисті і сухі, чисті і зволожені дощем, забруднені та зволожені*. Розрядні напруги, заміряні при вказаних станах поверхонь ізоляторів, називають, відповідно, *сухо -, волого -, мокро -, забруднено розрядними*.

Вплив метеорологічних умов на електричну міцність зовнішньої ізоляції враховується також при проведенні високовольтних випробувань. Для цього контролюються: тиск, температура та абсолютна вологість повітря, а виміряні значення розрядних напруг за допомогою спеціальних поправкових коефіцієнтів перераховуються (приводяться) до **нормальних умов** згідно ГОСТ 1516.1–76 (перевиданий 2001 року із змінами, діючий): *тиск $p_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па (760 мм рт.ст.), температура $T_0 = 293$ К (20^0 C), вологість $H_0 = 11 \cdot 10^{-3}$ кг \cdot м $^{-3}$ (11 г \cdot м $^{-3}$)*. При замірах мокро - волого розрядних напруг

ізоляторів *штучний дощ* (ГОСТ 1516.1–76) й *зволожені забруднення* (ГОСТ 10390–86 (перевиданий 1999 року із змінами, діючий)) створюються строго регламентованими способами.

Метеорологічні умови, забрудненість атмосфери на великих територіальних проміжках можуть суттєво бути різними. Наприклад, поблизу великих промислових центрів, у районах з солончаковими ґрунтами та на морських узбережжях різко збільшується концентрація забруднюючих речовин у повітрі, що знижує *вологорозрядні напруги* ізоляторів. Тому територія країни *районується* згідно кліматичних зон, ступеня та характеру забрудненості атмосфери, а зовнішня ізоляція електрообладнання проектується для цих зон (районів) із врахуванням їх особливостей.

Основний діелектрик зовнішньої ізоляції - атмосферне повітря - не піддається старінню, тобто незалежно від діючих на ізоляцію напруг та режимів роботи електрообладнання його середні характеристики залишаються незмінними у часі. Тому для суто повітряних проміжків, які становлять основу зовнішньої ізоляції, не існує проблеми термінів служби, яка при створенні внутрішньої ізоляції є однією з найбільш складних.

2.2 Електрофізичні процеси в газах

2.2.1 Збудження та іонізація атомів і молекул газу

Електронна оболонка **атома** спрощено може бути представлена у вигляді сукупності *кругових* або *еліптичних* орбіт, вздовж яких рухаються *електрони* навколо додатно зарядженого *ядра*. В **нормальному стані** електрони знаходяться на *найближчих* до ядра орбітах; потенціальна енергія атому мінімальна.

При наданні атому *додаткової енергії* один або декілька електронів можуть перейти на більш віддалені від ядра орбіти. Цей процес називається **електронним збудженням** атома. Енергія, необхідна для збудження, рівна різниці енергетичних рівнів електрона на віддаленій та нормальній орбітах.

Для **молекул**, які складаються з двох або більше атомів, крім електронного збудження при одержанні додаткової енергії можливе збудження **коливальних** або **обертальних** рівнів. Як правило, енергія, необхідна для такого збудження, мала (менше $1 \dots 2 e\text{-}V$). *Середній час* перебування атома чи молекули у *збудженому* стані складає $\sim 10^{-8} \text{ с}$. Повернення частинки у нормальний стан супроводжується випромінюванням **фотона**, причому для *молекулярних газів* через збудження низькоенергетичних рівнів можливе випромінювання фотонів малих енергій.

Чим більша енергія передається атому, тим на більш віддалену від ядра енергетичну орбіту переходить при збудженні електрон. Якщо електрон віддаляється від ядра настільки, що взаємозв'язок з ядром у нього практично втрачається, він стає *вільним*. Відбувається **іонізація атома**, в результаті якої утворюються дві частинки: *позитивний іон* q^+ та *негативний електрон* $q^- = e^-$. Енергія, необхідна для іонізації атома чи молекули, називається *енергією іонізації* W_i . В табл. 2.1 наведені значення енергій збудження та іонізації деяких

газів в *електрон-вольтах* ($1 e \cdot V = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$). Оскільки заряд електрона рівний $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ і незмінний, часто замість запису енергій користуються потенціалами збудження U_z та іонізації U_i , виключаючи з розрахунків значення заряду електрона.

Позитивний *іон* в свою чергу може бути іонізований, в результаті чого утворюються: *двозарядний іон* q^{++} та *негативний електрон* $q^- = e^-$. Можуть також утворюватися тризарядні й багатозарядні іони. Однак для цього необхідна істотно більша енергія.

Таблиця 2.1 - Енергія збудження й іонізації газів

Газ	Енергія збудження атомів чи молекул, $e \cdot V$	Енергія збудження метастабільних станів, $e \cdot V$	Енергія іонізації, $e \cdot V$			
			атома чи молекули	позитивного іона	двозарядного іона	тризарядного іона
N_2	6,1	6,2	15,8	–	–	–
N	6,3	2,4; 3,6	14,5	29,5	47,0	77,0
O_2	7,9	1,0; 1,8	12,5	34,7	54,8	77,5
O	9,1	2,0; 4,2	13,5	35,0	55,0	77,0
H_2	11,2	–	15,4	–	–	–
H	10,2	–	13,5	–	–	–
He	21,2	19,8; 20,7	24,5	54,4	–	–
CO_2	10,0	–	14,4	–	–	–
H_2O (пара)	7,6	–	13,2	–	–	–
Тривалість перебування, c	$\sim 10^{-8}$	$\sim 10^{-4}$	до зіткнення з електроном			

Важливу роль в процесах іонізації відіграють т. з. *метастабільні стани* атомів чи молекул. Тривалість перебування частинки у збудженому метастабільному стані становить $\sim 10^{-4} c$ і більше. За цей час частинка може отримати додаткову енергію і бути іонізованою. Такий процес називається **ступеневою іонізацією**.

2.2.2 Коефіцієнт ударної іонізації

Енергію, необхідну для іонізації чи збудження, нейтральна частинка отримує внаслідок зіткнення з **електроном**, який розганяється електричним полем під дією сили

$$\vec{F} = e \cdot \vec{E}, \quad (2.1)$$

де e – заряд електрона;

\vec{E} - напруженість електричного поля.

При зіткненні з нейтральною частинкою електрон віддає їй свою *кінетичну* енергію. Енергія, накопичена електроном в електричному полі, рівна:

$$W_e = e \cdot E \cdot x, \quad (2.2)$$

де x – відстань, яку пролітає електрон назустріч напрямку електричного поля \vec{E} .

Якщо W_e більша за енергію іонізації W_i , то при зіткненні електрона з нейтральною частиною відбувається іонізація. Якщо енергії електрона недостатньо для цього, то можливе збудження частинки. При зіткненні із збудженою частиною, яка знаходиться у метастабільному стані, такий електрон бере участь у ступеневій іонізації.

Відстань, яку повинен пролетіти електрон, щоб накопичити достатню для іонізації енергію, визначається як

$$x_i = \frac{W_i}{e \cdot E} = \frac{U_i}{E} \quad (2.3)$$

і залежить від напруженості електричного поля.

Розглянемо газ, частинки якого знаходяться у стані теплового (хаотичного) руху, постійно взаємодіючи (дотикаючись) одна з одною. Кількість зіткнень z на одиниці довжини $[1 \text{ см}]$ пропорційна концентрації N частинок газу (атомів або молекул):

$$z \sim N = \frac{p}{k \cdot T}, \quad (2.4)$$

де p - тиск газу;

T - температура газу;

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

Величина, зворотна числу зіткнень, $\lambda = \frac{1}{z} [\text{см}]$ - середня довжина вільного пробігу частинки. Дійсні довжини x вільних пробігів відрізняються від λ і піддані значному статистичному розкиду. Тому, має сенс поняття ймовірності $p(x)$ того, що довжина вільного пробігу частинки рівна або більша x . Відносна швидкість зменшення цієї ймовірності з ростом довжини вільного пробігу, очевидно, пропорційна кількості зіткнень. Тобто

$$\begin{aligned} -\frac{dx}{p(x)} &= \frac{1}{\lambda}; & \frac{dp(x)}{p(x)} &= -\frac{1}{\lambda} dx; & \ln p(x) &= -\frac{x}{\lambda}; \\ p(x) &= \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right). \end{aligned} \quad (2.5)$$

З іншого боку, якщо прийняти для простоти міркувань, що шлях x_i електрон пролітає без зіткнень, то це значить що енергія W_i набирається за один пробіг електрона. З врахуванням (2.5) ймовірність того, що електрон пролетить шлях x_i без зіткнень, рівна

$$p(x_i) = \exp\left(-\frac{x_i}{\lambda}\right), \quad (2.6)$$

що, одночасно, є ймовірністю набуття електроном енергії W_i , при якій можлива іонізація, тобто $p(x_i)$ можна вважати ймовірністю іонізації.

Процес іонізації газу шляхом співударів електронів з нейтральними молекулами називається ударною іонізацією і характеризується коефіцієнтом ударної іонізації α . Він рівний числу іонізацій, вироблених електроном на шляху

в 1 см назустріч напрямку дії сили електричного поля. Коефіцієнт α визначається добутком середнього числа зіткнень на шляху в 1 см та ймовірності іонізації:

$$\alpha = \frac{1}{\lambda} \cdot \exp\left(-\frac{x_i}{\lambda}\right) [\text{см}^{-1}]. \quad (2.7)$$

Оскільки число зіткнень пропорційне тиску

$$z = \frac{1}{\lambda} = A \cdot p,$$

то з врахуванням (2.3) одержуємо

$$\begin{aligned} \alpha &= A \cdot p \cdot \exp\left(-\frac{x_i}{\lambda}\right) = A \cdot p \cdot \exp\left(-\frac{W_i}{e \cdot E \cdot \lambda}\right) = \\ &= A \cdot p \cdot \exp\left(-\frac{A \cdot p \cdot W_i}{e \cdot E}\right) = A \cdot p \cdot \exp\left(-\frac{B}{E} \cdot p\right) [\text{см}^{-1}], \end{aligned} \quad (2.8)$$

де A та $B = \frac{A \cdot W_i}{e}$ - постійні (див. табл. 2.2), які залежать від характеристики газу та значень температури (із врахуванням (2.4)).

Таблиця 2.2 - Постійні величини A та B рівняння (2.8) при температурі 20°C

Газ	A , (см·мм рт. ст.) ⁻¹ ; $\times 0,75$ (м·Па) ⁻¹	B , $B \cdot$ (см·мм рт. ст.) ⁻¹ ; $\times 0,75$ В·(м·Па) ⁻¹	Границя зміни E/p , $B \cdot$ (см·мм рт. ст.) ⁻¹ ; $\times 0,75$ В·(м·Па) ⁻¹
Повітря	8,98	250	38 ... 150
Повітря	14,6	365	150 ... 600
Азот (N_2)	12,4	342	150 ... 600
Вуглекислий газ (CO_2)	20,0	466	500 ... 1000
Водень (H_2)	5,0	130	150 ... 400

При виведенні співвідношень (2.7) та (2.8) не врахований цілий ряд факторів, які супроводжують процес іонізації, наприклад, виникнення ступеневої іонізації. Тому, коефіцієнти A та B для кожного газу визначаються згідно експериментально одержаних залежностей відношення $\frac{\alpha}{p}$ від напруженості електричного поля E та тиску p при фіксованій температурі $T = const$:

$$\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right). \quad \Rightarrow A \text{ і } B$$

На рис 2.1 така залежність показана для повітря. В діапазоні зміни $\frac{E}{p} = 20 \dots 150 \left[B \cdot (\text{см} \cdot \text{мм рт. ст.})^{-1} \right] = 15 \dots 113 \left[B \cdot (\text{м} \cdot \text{Па})^{-1} \right]$ вона може бути представлена емпіричним виразом:

$$\frac{\alpha}{p} = 8,5 \cdot \exp\left(-\frac{250 \cdot p}{E}\right), \quad (2.9)$$

де E – напруженість електричного поля, В/см;
 p – тиск, мм рт. ст.;

$$T = 293 \text{ K} (20^{\circ}\text{C}) = \text{const.}$$

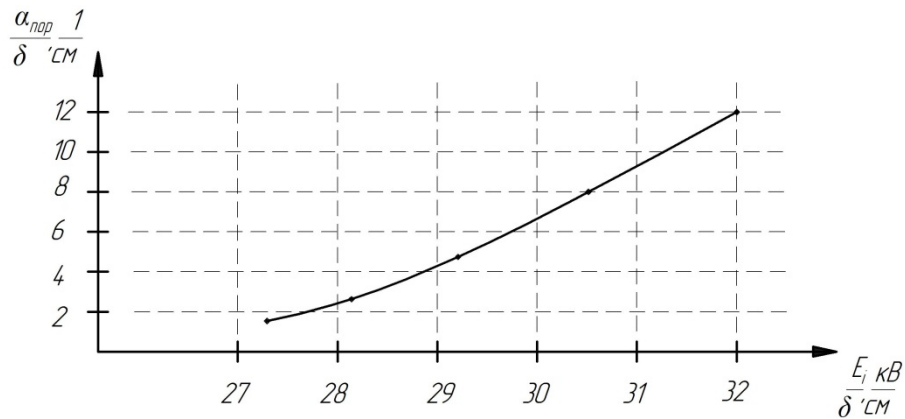


Рис. 2.1 - Залежність коефіцієнта ударної іонізації α (приведений до щільності газу) до напруженості електричного поля E (приведена)

Часто для розрахунків більш зручним є інший вираз:

$$\frac{\alpha}{p} = a \cdot \left(\frac{E}{p} - b \right)^2, \quad (2.10)$$

де для атмосферного повітря $a = 1,52 \cdot 10^{-4}$ (см·мм рт. ст. / B^2) та $b = 31,6$ ($B / \text{см·мм рт. ст.}$).

В процесі іонізації утворюються вільні електрони, позитивні іони та фотони. Фотонів утворюється набагато більше, ніж електронів чи іонів, оскільки енергія збудження набагато менша від енергії іонізації.

Приклад 2.1	
<p>Умова:</p> <p>Напруженість електричного поля рівна в розрядному проміжку $E = 30 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$, а тиск змінюється в межах від $p_1 = 760$ до $p_2 = 720 \text{ мм рт. ст.}$</p>	<p>Формули для розв'язування:</p> $\alpha = A \cdot p \cdot \exp\left(-\frac{B}{E} \cdot p\right) [\text{см}^{-1}]$
<p>Запитання:</p> <p>Визначити число іонізацій, які здійснює електрон на проміжку довжиною 10 см.</p>	
<p>Рисунок:</p>	
<p>Пояснення:</p> <p>Необхідно визначити постійні A та B для даних умов ударної іонізації.</p>	
<p>Розв'язання:</p> <p>Визначимо приведені до тиску значення напруженості електричного поля:</p> $\frac{E}{p_1} = \frac{30000}{760} = 39,47 \left[B \cdot (\text{см} \cdot \text{мм рт. ст.})^{-1} \right];$	

$$\frac{E}{p_2} = \frac{30000}{720} = 41,67 \left[B \cdot (cm \cdot mm \text{ рт. ст.})^{-1} \right].$$

Тоді з табл. 2.2 маємо:

$$A = 8,9 \left[cm \cdot mm \text{ рт. ст.} \right]^{-1}; \quad B = 250 \left[B \cdot (cm \cdot mm \text{ рт. ст.})^{-1} \right].$$

Коефіцієнт ударної іонізації: $\alpha_1 = 11,98 \left[cm^{-1} \right]$; $\alpha_2 = 15,88 \left[cm^{-1} \right]$.

Відповідь:

Число іонізацій, здійснюваних електроном на розрядному проміжку довжиною 10 см: $z_1 = 110 \dots 120$; $z_2 = 150 \dots 160$.

2.2.3 Негативні іони

Електрони, які утворились в процесі іонізації, в свою чергу беруть подальшу участь у процесі іонізації, утворюючи **лавину електронів**. Однак деяка частина електронів при зіткненні з нейтральними молекулами або атомами може бути ними *захоплена*. При цьому утворюються *негативні іони*. Стійкість утворених негативних іонів залежить від *енергії спорідненості* W_c атома з електроном, тобто від енергії, яка виділяється при захопленні електрона атомом.

Таблиця 2.3 - Енергії спорідненості деяких газоподібних речовин

Речовина	F	Cl	Br	I	O	O ₂	H	H ₂ O	He	N ₂
W _c , e·В	3,6	3,8	3,5	3,2	2,0	0,9	0,7	0,9	< 0	< 0

Якщо енергія спорідненості *від'ємна*, утворення *негативного іона* неможливе. Найбільшою позитивною енергією спорідненості володіють *галогени: фтор, хлор, йод* та з'єднання, до складу яких входять атоми цих елементів. В кисні, а значить в повітрі та в парах води, також можливе утворення негативних іонів.

Гази, в яких при іонізації утворюються негативні іони, називаються **електронегативними**. Інші гази (азот, інертні гази) - **електропозитивні**.

При зіткненні негативного іона з частинною, яка володіє енергією рівною або більшою за енергію спорідненості, відбувається звільнення електрона. Процес *розвалу* негативного іона тим більше ймовірний, чим вища напруженість електричного поля. Наприклад, відрив електрона від молекулярного іона кисню O₂⁻ відбувається при приведеній напруженості електричного поля $\frac{E}{p} \geq 45 B \cdot (cm \cdot mm \text{ рт. ст.})^{-1}$ або при нормальному атмосферному тиску при напруженості $E \geq 35 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$.

2.2.4 Ефективний коефіцієнт ударної іонізації

Процес захоплення електронів частинками газу характеризується **коефіцієнтом захоплення (прилипання) η** електронів, який рівний числу актів захоплення (*прилипання*) на шляху в 1 см. В *електронегативних* газах, в тому

числі і в повітрі, процес ударної іонізації характеризуються **ефективним коефіцієнтом іонізації α_{ef}** :

$$\alpha_{ef} = \alpha - \eta. \quad (2.11)$$

При аналізі іонізаційних процесів в атмосферному повітрі зручно користуватися його **відносною густиною**:

$$\delta = \frac{N}{N_0} = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{k \cdot T_0}{k \cdot T} = \frac{T_0 \cdot p}{p_0 \cdot T} \quad (2.12)$$

де N , p та T - концентрація частинок, тиск та температура повітря в розрахункових умовах або в умовах досліду;

$p_0 = 101,3 \text{ кПа} = 760 \text{ мм рт. ст.}$ та $T_0 = 293 \text{ К} (20^0\text{С})$ – нормальні атмосферні умови;

N_0 – концентрація частинок в цих умовах.

Середня довжина вільного пробігу λ електронів (див. (2.4)) пропорційна приведеній температурі T/p або у відповідності з (2.12) обернено пропорційна щільності газу δ . Тому значення коефіцієнтів ударної іонізації та коефіцієнта прилипання можуть бути представлені у вигляді приведених залежностей α / δ , η / δ та α_{ef} / δ від приведеної напруженості E / δ (див. рис. 2.1), а емпірична

формула, аналогічна (2.10), для коефіцієнта α_{ef} , оскільки $\frac{\alpha}{p} \rightarrow \frac{\alpha}{\delta}$, - у вигляді:

$$\frac{\alpha_{ef}}{\delta} = 0,2 \cdot \left(\frac{E}{\delta} - 24,5 \right)^2, \quad (2.13)$$

$$\alpha_{ef} = \frac{0,2}{\delta} \cdot (E - 24,5)^2.$$

Як впливає з (2.13), при *нормальних* атмосферних умовах ($\delta = 1$) ефективний коефіцієнт ударної іонізації стає більшим нуля при значеннях напруженості електричного поля $E \geq 24,5 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$.

Тому напруженість електричного поля $E_0 = 24,5 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$ представляє собою **початкову (порогову) напруженість**, перевищення якої в нормальних умовах викликає процес іонізації електронами повітря. При $\delta \leq 1$, наприклад, на висоті 2 км над поверхнею землі щільність газу $\delta = 0,82$, а порогова напруженість електричного поля зменшується до 20 кВ/см.

2.3 Вторинна іонізація

Позитивні іони практично не можуть іонізувати молекули газу через малу рухливість, значно меншу, ніж в електрона, довжину вільного пробігу, необхідність накопичувати вдвічі більшу, ніж потрібно для іонізації енергію, через *непружність* співудару з іншими іонами чи молекулами.

Однак, **позитивні іони**, які бомбардують **катод**, можуть вивільнити з нього *електрони*, т. я. робота виходу електронів з металу *катода* (мідь, сталь) складає $W_{вих} \approx 4,5 \text{ eV}$, що істотно менше енергії іонізації і збудження молекул газів, які входять до складу повітря. Процес відбувається більш ефективно при

низьких тисках газу, коли зростають довжини вільного пробігу іонів ($\lambda = \frac{1}{z} \sim \frac{1}{N} = \frac{k \cdot T}{p} \Rightarrow \lambda \sim \frac{1}{p}$).

В процесі іонізації газу виникає велика кількість збуджених частинок, які переходячи у нормальний стан, випромінюють **фотони**. Якщо енергія фотону перевищує енергію іонізації $h \cdot \nu \geq W_i$, де ν - частота випромінювання, s^{-1} ; $h = 4,15 \cdot 10^{-15} e \cdot V \cdot c$ - постійна Планка, то при поглинанні його атомом чи молекулою вивільнюється електрон - відбувається акт *фотоіонізації* газу. Оскільки енергія фотонів відповідає енергії збудження, яка для *однорідного газу* завжди менша його енергії іонізації, фотоіонізація може успішно здійснюватися тільки в **сумішах газів**, які містять компоненти з відносно низькою енергією іонізації, володіючи низькоенергетичними коливальними, обертальними енергетичними рівнями (**ефект Пеннінга**).

В *повітрі* фотоіонізація відбувається в *сильних* електричних полях, коли стає можливим збудження **позитивних іонів**, і при переході їх у незбуджений стан випромінюються фотони з достатньо високою енергією. Ця енергія вища роботи виходу електронів з катоду, а тому в повітрі ефективна **фотоіонізація на катоді**.

Обидва *фотоіонізаційні процеси*: в об'ємі газу і на катоді, а також вивільнення електронів при бомбардуванні катоду позитивними іонами відбуваються як наслідок ударної іонізації. Ці процеси називаються процесами **вторинної іонізації**, а відповідні електрони – *вторинними*.

Кількість вторинних електронів пропорційна числу актів ударної іонізації. Коефіцієнт пропорційності γ називається **коефіцієнтом вторинної іонізації** і залежить від природи та тиску газу, матеріалу катоду, напруженості електричного поля та ін. При розрядах у *повітрі* з переважним впливом бомбардування *катоду* позитивними іонами коефіцієнт $\gamma \sim 10^{-2} [cm^{-1}]$.

2.4 Рекомбінація заряджених частинок

Одночасно з іонізацією відбувається процес взаємної нейтралізації заряджених частинок, який називається **рекомбінацією**. Число рекомбінацій в $1 cm^3$ газу за одиницю часу пропорційне числу зустрічей протилежно заряджених частинок, яке, в свою чергу, пропорційне їх *концентраціям*. Тому, швидкість зменшення концентрації заряджених частинок може бути записана як:

$$\frac{dN_+}{dt} = \frac{dN_-}{dt} \sim -N_+ \cdot N_- = -\rho \cdot N_+ \cdot N_-, \quad (2.14)$$

де ρ - **коефіцієнт рекомбінації**, рівний числу актів рекомбінацій в $1 cm^3$ за $1 s$, віднесених до добутку концентрацій заряджених частинок, cm^3 / s .

Оскільки у більшості випадків $N_+ = N_- = N$ рівняння (2.14) можна записати по-іншому:

$$\frac{dN_+}{dt} = \rho \cdot N^2; \quad \frac{dN_+}{N^2} = \rho \cdot dt; \quad -\frac{1}{N} + c = -\rho \cdot t.$$

Постійну інтегрування визначимо з умови, що при $t = 0$ початкова

концентрація частинок того чи іншого знаку була рівна N_0 . Тоді $c = +\frac{1}{N_0}$ і рівняння запишеться у вигляді:

$$-\frac{1}{N} + \frac{1}{N_0} = -\rho \cdot t; \quad \frac{N - N_0}{N \cdot N_0} = -\rho \cdot t; \quad 1 - \frac{N_0}{N} = \rho \cdot N_0 \cdot t;$$

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{1 + \rho \cdot N_0 \cdot t}. \quad (2.15)$$

При *значних* початкових концентраціях частинок значення $\rho \cdot N_0 \cdot t$ швидко стає набагато більшими за одиницю. Тому

$$N \approx \frac{1}{\rho \cdot t} \quad \text{або} \quad \rho \approx \frac{1}{N \cdot t}. \quad (2.16)$$

При *атмосферному тиску* коефіцієнт рекомбінації $\rho \sim 10^{-6} \text{ [см}^3 / \text{с]}$.

Нейтральні частини, які утворились при рекомбінації, володіють меншою енергією, ніж суми енергій рекомбінованих частинок. Надлишок енергії виділяється у вигляді випромінювання (*фотонів*).

2.5 Термоіонізація

При значному підвищенні температури газу кінетична енергія нейтральних частинок зростає настільки, що стає можливою іонізація при їх *зіткненні*. При температурі $T_0 = 293 \text{ K}$ (20°C) кінетична енергія частинок становить $W_k = \frac{3}{2} k \cdot T_0 = 0,04 \text{ [e} \cdot \text{В]}$, а при температурі $T = 2 \cdot 10^4 \text{ K}$ збільшується до $W_k = 2,6 \text{ [e} \cdot \text{В]}$. При таких температурах може відбутись **ступенева термоіонізація**.

Одночасно з іонізацією відбувається рекомбінація заряджених частинок. Якщо настає *рівновага*, тобто за одиницю часу виникає та рекомбінує однакова кількість заряджених частинок, такий *стан газу* характеризується певним *ступенем іонізації* m , який представляє собою відношення концентрації іонізованих частинок до загальної концентрації частинок:

$$m = \frac{N_i}{N}. \quad (2.17)$$

Ступінь іонізації m газу при заданій температурі може бути розрахований згідно формули, запропонованої індійським вченим Сах́а (Мегхнад Сах́а):

$$p = \frac{m^2}{1 - m^2} = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot T^{2,5} \cdot \exp\left(-\frac{W_i}{k \cdot T}\right), \quad (2.18)$$

де p - тиск газу, *мм рт. ст.*;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{K}^{-1} = 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ e} \cdot \text{В} \cdot \text{K}^{-1}$ - постійна Больцмана.

W_i - енергія іонізації газу, *e*·В.

Графік залежності $m = m(T)$ поданий на рис. 2.3.

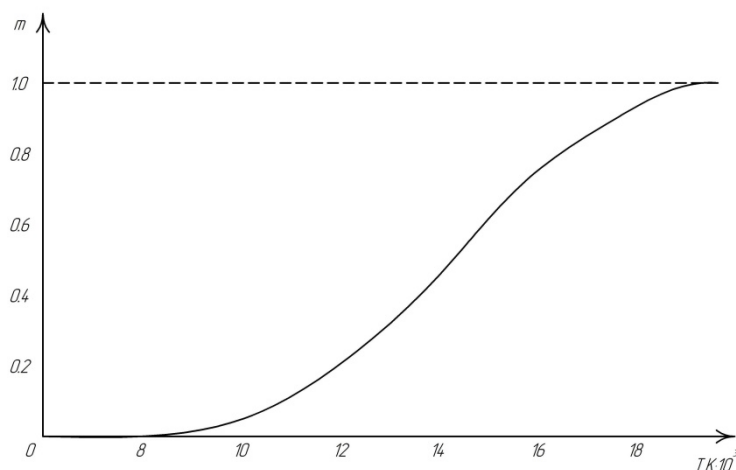


Рис. 2.3 - Залежність ступеня іонізації повітря m від температури

Газ, у якого значна кількість частинок іонізована дією тепла, називається **плазмою**. Концентрації *позитивно й негативно* заряджених частинок у плазмі приблизно однакові. Плазма представляє собою форму існування речовини при *високій температурі*.

Підсумок

Зовнішня ізоляція електроустановок високої напруги - це ізоляційні проміжки між електродами (проводами ліній, шинами розподільних пристроїв та ін.), в яких роль основного діелектрика виконує повітря. Для зовнішньої ізоляції характерна залежність електричної міцності від метеорологічних умов.

Електричну міцність проміжків вздовж поверхонь ізоляторів зовнішньої установки вимірюють в умовах, які відповідають різним механізмам розрядних процесів, і називають сухо -, волого -, мокро -, забруднено розрядною.

Електронним збудженням атома називається процес переходу електронів на більш віддалені енергетичні орбіти. Повернення частинки у нормальний стан супроводжується випромінюванням фотона.

Якщо електрон віддаляється від ядра настільки, що взаємозв'язок з ядром у нього практично втрачається, він стає вільним - відбувається іонізація атома, в результаті якої утворюються дві частинки: позитивний іон та негативний електрон.

Метастабільні стани атомів чи молекул - збуджений стан, протягом якого частинка може отримати додаткову енергію і бути іонізованою - ступенева іонізація.

Коефіцієнт ударної іонізації рівний числу іонізацій, вироблених електроном на шляху в 1 см назустріч напрямку дії сили електричного поля.

Деяка частина електронів при зіткненні з нейтральними молекулами або атомами може бути ними захоплена - утворюються негативні іони. Газу, в яких

при іонізації утворюються негативні іони, називаються електронегативними. Інші гази (азот, інертні гази) - електропозитивні. В електронегативних газах, в тому числі і в повітрі, процес ударної іонізації характеризується ефективним коефіцієнтом іонізації:

Позитивні іони, які бомбардують катод, можуть вивільнити з нього електрони, робота виходу яких істотно менша енергії іонізації і збудження молекул газів.

Фотоіонізація може успішно здійснюватися тільки в сумішах газів, які містять компоненти з відносно низькою енергією іонізації, володіючи низькоенергетичними коливальними, обертальними енергетичними рівнями (ефект Пеннінга).

Фотоіонізаційні процеси в об'ємі газу і на катоді, а також вивільнення електронів при бомбардуванні катоду позитивними іонами називаються процесами вторинної іонізації, а відповідні електрони – вторинними.

Одночасно з іонізацією відбувається процес взаємної нейтралізації заряджених частинах, який називається рекомбінацією.

Газ, у якого значна кількість частинок іонізована дією тепла, називається плазмою. Концентрації позитивно й негативно заряджених частинок у плазмі приблизно однакові.

Запитання

Що відносять до зовнішньої ізоляції електроустановок високої напруги?

Від яких факторів залежать розрядні напруги елементів зовнішньої ізоляції.

Які розрядні напруги називають сухо -, волого -, мокро -, забруднено розрядними.

Що таке електронне збудження атома? Який характер має збудження низькоенергетичних рівнів?

Що таке іонізація атома і які частинки при цьому утворюються?

В чому полягає процес ступеневої іонізації?

Дайте визначення коефіцієнта ударної іонізації.

Що таке негативні іони і які умови їх утворення? Назвіть електропозитивні й електронегативні гази.

Дайте визначення коефіцієнта захоплення (прилипання) електронів й ефективного коефіцієнта іонізації.

Що таке початкова (порогова) напруженість електричного поля і як вона залежить від щільності газу?

Що таке вторинна іонізація і який енергетичний механізм у ній задіяний?

Що таке плазма і яка умова її підтримування?

ЛЕКЦІЯ №10

[2, с. 64–67; 5, с. 25–30; 7, с. 16–22; 8, с. 70–89]

2.6 Лавина електронів

Розглянемо розрядний проміжок між двома електродами у газі. Якщо в цьому проміжку з'явився електрон, то, рухаючись до аноду при достатній напруженості електричного поля він може при зіткненні *іонізувати* молекулу газу. Вільний електрон, який утворився в результаті цього процесу, разом з первинним електроном іонізують нові молекули. Кількість нових електронів буде неперервно зростати. Процес наростання кількості *електронів*, які рухаються в електричному полі в напрямку до *аноду*, називається **лавиною електронів**.

Припустимо, що у лавині, яка пройшла відстань x , міститься n електронів. На шляху dx кожен з них здійснить $\alpha_{ef} \cdot dx$ іонізацій. Тому, *збільшення* числа електронів на шляху dx буде рівне $dn = \alpha_{ef} \cdot n \cdot dx$.

Після розподілу змінних та інтегрування отримаємо, що число електронів у лавині, яка пройшла шлях x , наростає у експоненційній залежності й складає:

$$n(x) = \exp\left(\int_0^x \alpha_{ef}(x) dx\right). \quad (2.19)$$

Якщо електричне поле **однорідне** і напруженість його всюди однакова, то коефіцієнт α_{ef} не залежать від координати x і рівняння (2.19) прийме вигляд:

$$n(x) = \exp(\alpha_{ef} \cdot x) = \exp(\alpha \cdot x), \quad (2.20)$$

оскільки ми розглядаємо процес збільшення числа електронів у лавині без врахування вкладу коефіцієнта захоплення (прилипання) η у коефіцієнт ударної іонізації α .

У своєму *розвитку* лавина електронів розширюється внаслідок **дифузії** (руху із області підвищеної концентрації у область з пониженою концентрацією частинок) та **електростатичного розштовхування**.

Якщо врахувати, що лавина в початковій стадії має форму *кулі*, то зміна в часі її радіуса r_0 внаслідок дифузії (*дифузійний радіус*) розраховується згідно формули:

$$r_0 = \sqrt{6 \cdot D \cdot t} \quad (2.21)$$

де D – коефіцієнт дифузій, $cm^2 \cdot c^{-1}$ (у повітрі для *електронів* в нормальних умовах $D_e = 12,7 cm^2 \cdot c^{-1}$, а *іонів* - $D_i = 0,05 cm^2 \cdot c^{-1}$).

Здійснивши у (2.21) заміну $t = \frac{x}{V_e}$, можна розрахувати радіус лавини в залежності від пройденого шляху:

$$r_0 = \sqrt{6 \cdot D \cdot \frac{x}{V_e}}. \quad (2.22)$$

де V_e - швидкість дрейфу *електрона* в електричному полі (див. рис. 2.4).

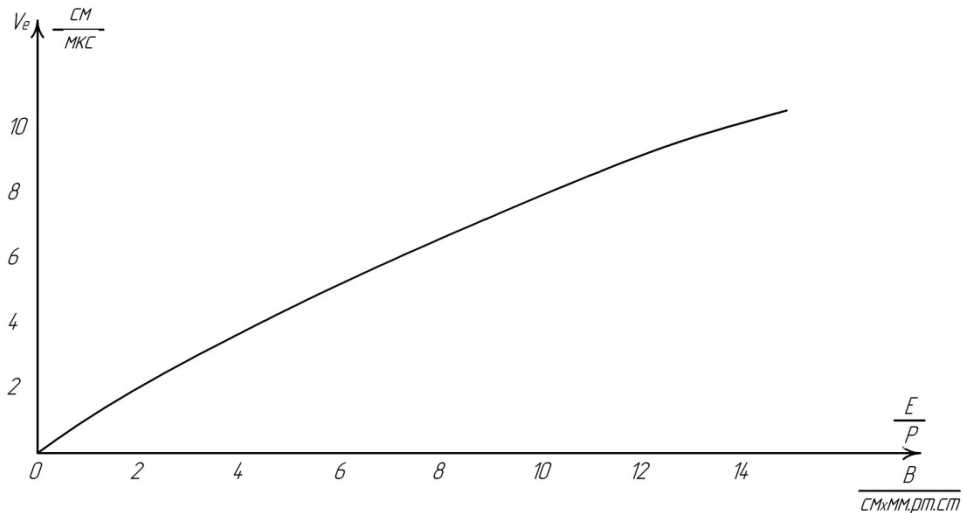


Рис. 2.4 - Графік залежності швидкості дрейфу електрона в повітрі від приведеної до тиску величини напруженості електричного поля

Визначимо зміну радіуса лавини внаслідок електростатичного розштовхування (**електростатичний радіус** r_e). Напруженість електричного поля на зовнішній границі лавини, яка має форму кулі радіуса r_e , визначається як:

$$E_l = \frac{e \cdot n}{4\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r_e^2}, \quad (2.23)$$

де $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл - заряд електрона;

n - кількість електронів у лавині;

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф·м⁻¹ - електрична постійна.

Швидкість *розширення* лавини під дією напруженості E_l рівна:

$$\frac{dr_e}{dt} = K_e \cdot E_l = K_e \cdot \frac{e \cdot n}{4\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r_e^2}, \quad (2.24)$$

де $K_e = \frac{V_e}{E_0}$ - рухливість електронів при заданій напруженості електричного поля

$$E_0, \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1};$$

E_0 - початкова напруженість електричного поля.

В електричному полі з напруженістю E_0 , при якій настає можливість іонізаційного процесу $K_e = 400 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$.

Враховуючи, що зміщення *центра лавини* у зовнішньому електричному полі напруженістю E_0 за час dt складає $dx = K_e \cdot E_0 \cdot dt$, а приріст числа електронів на шляху dx рівний $dn = \alpha \cdot n \cdot dx$ можна записати з врахуванням (2.24):

$$r_e^2 \cdot dr_e = \frac{e \cdot dn}{4\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \alpha \cdot E_0}. \quad (2.25)$$

Інтегруючи (2.25), одержимо вираз для *електростатичного радіуса* r_e лавини:

$$r_e = \left(\frac{3 \cdot e \cdot n(x)}{4\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \alpha \cdot E_0} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (2.26)$$

де $n(x)$ - кількість електронів у лавині (залежить від пройденого шляху x згідно (2.20)).

На рис. 2.5 показані залежності дифузійного та електростатичного радіусів від пройденого лавиною електронів шляху в *однорідному* електричному полі з напруженістю $E_0 = 30 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$ при *нормальних* атмосферних умовах. При числі електронів $n \leq 10^4 \dots 10^5$ радіус лавини визначається в основному *дифузією*, а при $n \geq 10^5 \dots 10^6$ - *електростатичним* розштовхуванням.

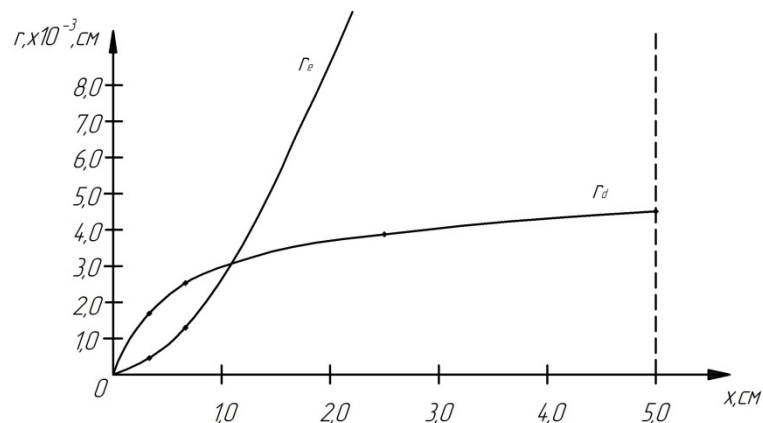


Рис. 2.5 - Залежність дифузійного r_d та електростатичного r_e радіусів лавини електронів від пройденого шляху у повітрі

В процесі іонізації одночасно з *електронами* утворюються *позитивні іони*. Внаслідок значної різниці у рухливостях електронів та іонів за час руху лавини електронів до аноду позитивні іони практично залишаються на місці їх виникнення. Це дозволяє визначати концентрацію позитивних іонів вздовж шляху розвитку лавини (по сліду лавини).

Якщо лавина на відстані x від катода налічує n електронів, то на шляху dx вони в результаті іонізації створить $dn = \alpha \cdot n \cdot dx$ позитивних іонів, які розмістяться в об'ємі $dV_+ = \pi \cdot r^2 \cdot dx$. Тому, концентрація позитивних іонів рівна:

$$N_+ = \frac{dn_+}{dV_+} = \frac{\alpha \cdot n \cdot dx}{\pi \cdot r^2 \cdot dx} = \frac{\alpha}{\pi \cdot r^2} \cdot \exp(\alpha \cdot x), \quad (2.27)$$

де r - визначається згідно (2.22) або (2.26) через дифузійний або електростатичний радіуси лавини.

Приклад 2.3

Умова:

В повітряному проміжку довжиною $L = 5 \text{ см}$ під дією однорідного електричного поля напруженістю $E_0 = 30 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$ та атмосферному тиску

Формули для розв'язування:

$$r_d = \sqrt{6 \cdot D \cdot \frac{x}{V_e}};$$

<p>$p = 730 \text{ мм рт. ст.}$ розвивається розряд з коефіцієнтом ударної іонізації $\alpha = 10 \text{ см}^{-1}$.</p> <p>При цьому у лавині на відстані $x_1 = 0,25 \text{ см}$ перебувало $n_1 = 1 \cdot 10^2$ електронів, на відстані $x_2 = 0,5 \text{ см}$ - $n_2 = 1 \cdot 10^3$, $x_3 = 1,0 \text{ см}$ - $n_3 = 1 \cdot 10^4$, $x_4 = 2,5 \text{ см}$ - $n_4 = 1 \cdot 10^6$, $x_5 = 5,0 \text{ см}$ - $n_5 = 1 \cdot 10^{10}$.</p>	$r_e = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot e \cdot n_e}{4\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \alpha \cdot E_0}}$
<p>Запитання:</p> <p>Обчислити дифузійний r_d й електростатичний r_e радіуси лавини у ході її розвитку. Побудувати графічну залежність $r_d(r_e) = f(x)$.</p>	
<p><i>Рисунок:</i></p>	
<p>Див. рис. 2.5.</p>	
<p>Пояснення:</p> <p>Швидкість дрейфу електрона в електричному полі визначаємо з експериментальної залежності (див. рис. 2.4), яку необхідно перевірити при розрахунку:</p> $V_e = f\left(\frac{E}{p}\right) = f\left(35 \dots 45 \left[B \cdot (\text{см} \cdot \text{мм рт. ст.})^{-1} \right]\right) \approx (16 \dots 20) \cdot 10^6 \left[\text{см} \cdot \text{с}^{-1} \right].$ <p>Коефіцієнт дифузії електронів $D_e = 12,7 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Заряд електрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$. Електрична постійна $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$.</p>	
<p><i>Розв'язання:</i></p>	
<p>Відповідь:</p>	

2.7 Умова самостійності розряду. Лавинно–стрімерний розряд

В природі постійно діють такі іонізатори, як космічні частинки, радіоактивне опромінення Землі, ультрафіолетове випромінювання Сонця. Завдяки цим факторам у проміжку між електродами безперервно виникають вільні електрони. Під дією прикладеної до проміжку напруги достатньої величини у ньому будуть утворюватися *одиначні лавини* електронів. Рух заряджених частинок у проміжку створює струм розряду між електродами. Якщо *ізолювати* проміжок від дії зовнішнього іонізатора, струм у ньому припиниться. Такий процес, для підтримання якого необхідний зовнішній іонізатор називається *несамостійним розрядом*.

Для того, щоб розряд став *самостійним* і міг існувати при відсутності зовнішнього іонізатора, необхідно, щоб у результаті розвитку початкової лавини з'явився **хоча б один вторинний** електрон (як результат дії низько енергетичного фотону чи іону) здатний зніціювати *нову лавину*. Таким чином, аналогічно (2.19) для вторинної іонізації з коефіцієнтом γ **умову самостійності розряду** можна записати у вигляді:

$$\gamma \cdot n = \gamma \cdot \left[\exp\left(\int_0^x \alpha(x) dx - 1\right) \right] \geq 1 \quad (2.28)$$

або у випадку *однорідного* поля:

$$\gamma \cdot (e^{\alpha \cdot L} - 1) \geq 1, \quad (2.29)$$

де L – відстань між електродами;

$\gamma \cdot n$ - кількість *вторинних* електронів.

Напруга, при якій в розрядному проміжку виконується умова самостійності розряду, називається **початковою** U_0 .

Відомо, що коефіцієнт вторинної іонізації γ залежить від тиску газу та напруженості електричного поля $\gamma = \gamma(p, E)$. Однак, діапазон цієї залежності невеликий і з достатньою точністю можна вважати, що $\ln \frac{1}{\gamma} \approx const$. Тому часто

користуються іншим виразом умови самостійності розряду для *неоднорідного* поля, розділивши вираз (2.28) на γ :

$$\int_0^x \alpha(x) dx = \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) \approx const = K \quad (2.30)$$

або у випадку *однорідного* поля

$$\alpha \cdot L \approx const = K. \quad (2.31)$$

З виразів (2.30) та (2.31) витікає, що для виконання умови самостійності розряду необхідно, щоб *число іонізацій* здійснюваних одним електроном на шляху між електродами, було не менше деякої певної величини K . Для *повітря* при низьких тисках $K = 4$, а при атмосферному тиску $K = 8 \dots 20$.

Розглянемо процес розвитку самостійного розряду в **однорідному** електричному полі. Якщо справедливий вираз (2.29), кількість лавин, що утворюються у розрядному проміжку буде безперервно зростати. Чергові лавини будуть виникати ще до його, як всі позитивні іони, утворені попередніми лавинами, зійдуть на катод. Тому, *електрони* нових лавин будуть рухатись у проміжку, заповненому позитивними *іонами*. Отже, вздовж шляху лавин газ у проміжку між електродами перейде у стан **плазми** - відбудеться пробій проміжку. При експериментальній перевірці основних положень *лавинної теорії розряду* Джона Таунсенда (1900 р.; британський фізик і математик; *John Sealy Townsend* (7.06.1868 - 16.02.1957)) було виявлено, що розрядний процес відбувається значно швидше.

Подальшим розвитком лавинної теорії розряду була запропонована в 1939 році вченими Гансом Ретером, Джоном М. Міком та Леонардом В. Лебом *стрімерна теорія розряду*. В процесі розвитку лавини безперервно збільшується число електронів та позитивних іонів. При цьому напруженість електричного поля на фронті лавини зростає, а у хвості зменшується (див. рис. 2.6). В деякий момент цього процесу напруженість у задній частині лавини зменшується настільки, що стає *неможливою ударна іонізація*. Електрони, які відстали від фронту лавини, разом з позитивними іонами утворюють *плазмове утворення*, яке дасть початок виникненню **стрімерного каналу** - каналу високої провідності,

заповненому позитивними і негативними об'ємними зарядами (*strimer* - довга тонка стрічка, потічок).

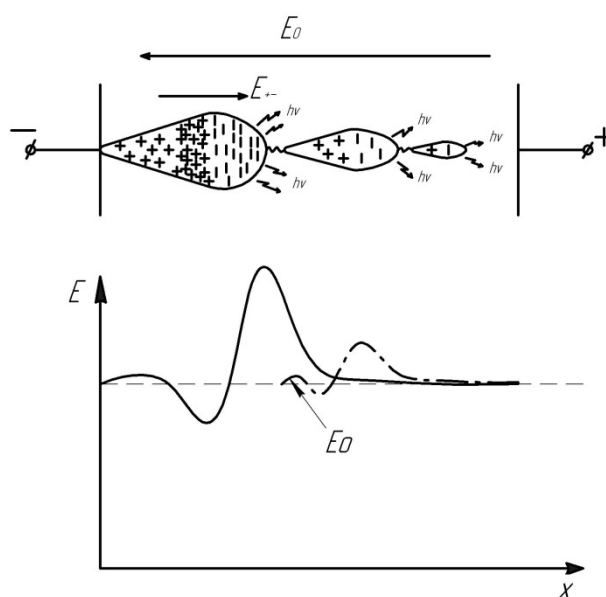


Рис. 2.6 - Спотворення однорідного електричного поля розвитком лавини в розрядному проміжку

З іншого боку лавини, - з її фронту, збільшується об'ємний заряд електронів, напруженість електричного поля, що знову ж таки завдяки ударній іонізації приводить до критичного збільшення концентрації електронів: $e^{\alpha \cdot x} \approx e^{20}$. За цих умов з фронту лавини відділяються активні високоенергетичні *фотони*, які перед лавиною іонізують газ, що приводить до створення нових джерел електронних лавин. Нові лавини повинні пройти меншу відстань, щоб у їх фронті густина заряду досягла критичної величини, так як вони розвиваються у місцях з більшою напруженістю поля через вплив *об'ємних зарядів*. Лавини з часом зливаються і утворюють *стримерний канал*.

Згідно **стримерної теорії** умовою самостійності розряду є перехід лавинного розряду у *стример* - канал, заповнений *плазмою*, який при подальшому розвитку розряду переходить в канал ще більшої провідності - *головний розряд*, що замикає розрядний проміжок накоротко. Тому, *тривалість формування головного розряду* в однорідному полі розряду складається з трьох частин:

- часу утворення початкової лавини;
- часу проростання *стримера* на всю довжину проміжку;
- часу переходу стримера у *головний розряд*.

В **різко неоднорідному** електричному полі умова самостійності розряду виконується в дуже вузькій зоні поблизу електрода, який створює неоднорідність поля. Це означає, що іонізаційні процеси концентруються в цій зоні і створюють характерне свічення - **коронний розряд** або *корону*. *Початкова напруга*, тобто напруга виконання умови самостійності розряду, відповідає напрузі виникнення коронного розряду. Розвиток стримера в цьому полі також відбувається, але по-іншому. Рух початкових лавин здійснюється в спадаючому електричному полі, як це показано на рис. 2.7. Тому, лавини, ініційовані високоенергетичними

фотонами у всьому об'ємі утворюватися не можуть, а тільки у відносно вузькій області поблизу електрода, що створює неоднорідність електричного поля, на вершині фронту лавини, вздовж найбільшої напруженості поля.

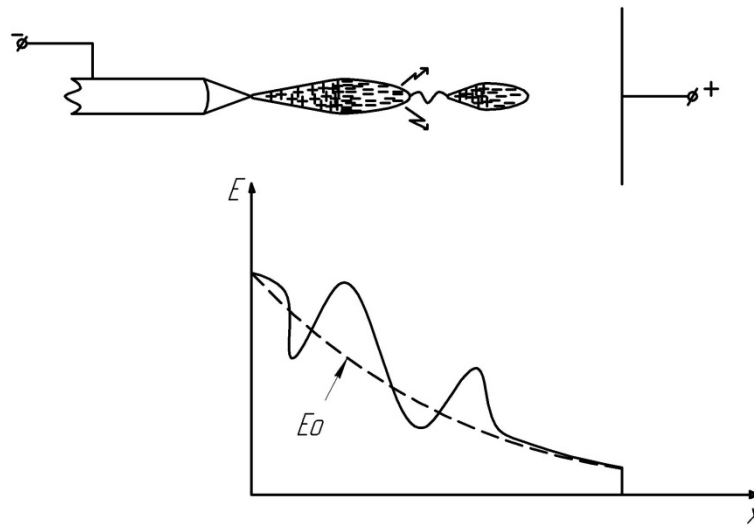


Рис. 2.7 - Розвиток початкової лавини в розрядному проміжку «стрижень–площина» з неоднорідним електричним полем

Подальший розвиток розряду відбувається після злиття початкової та нової лавин. *Пробій* коронуючого проміжку відбувається при напрузі, значно більшій від своєї початкової. Цим також пояснюється збільшення часу формування головного розряду в неоднорідному електричному полі у порівнянні з однорідним.

Розглянемо умову лавино – стримерного розряду в однорідному електричному полі згідно теорії Ю. Г. Сергеева («МЕІ»). З виразу (2.13) випливає, що іонізація припиняється ($\alpha = 0$), якщо $E \leq b \cdot \delta$ (для повітря $b = 24,5 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$). Напруженість електричного поля в заданій частині лавини рівна $E = E_0 - E_{\text{л}}$ (E_0 - напруженість зовнішнього електричного поля; $E_{\text{л}}$ - напруженість, що створює об'ємний заряд лавини). Тому, критерій переходу лавини у стример:

$$E_0 - E_{\text{л}} \leq b \cdot \delta. \quad (2.32)$$

Підставляючи в (2.32) значення напруженості електричного поля на зовнішній границі лавини з (2.23) та враховуючи електростатичний радіус лавини з (2.26), знайдемо число електронів у лавині при переході її в стример (критичне число електронів, $n_{\text{кр}}$):

$$E_0 - \frac{e \cdot n_{\text{кр}}}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot r_e^2} \leq b \cdot \delta; \quad E_0 - \frac{e \cdot n_{\text{кр}}}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \left(\frac{3 \cdot e \cdot n_{\text{кр}}}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \alpha_{\text{эф}} \cdot E_0} \right)^{\frac{2}{3}}} \leq b \cdot \delta;$$

$$(|E_0 - b\delta|)^3 \leq \frac{(e \cdot n_{\text{кр}})^3 \cdot (4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \alpha_{\text{эф}} \cdot E_0)^2}{(4\pi \cdot \epsilon_0)^3 \cdot 9 \cdot (e \cdot n_{\text{кр}})^2};$$

$$n_{кр} \geq \frac{36 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0}{e} \cdot \frac{(|E_0 - b \cdot \delta|)^3}{(\alpha_{эф} \cdot E_0)^2}. \quad (2.33)$$

З іншого боку, в однорідному електричному полі $n_{кр} = \exp(\alpha \cdot x_{кр})$, де $x_{кр}$ - критична довжина лавини. Звідки:

$$\alpha_{эф} \cdot x_{кр} = \ln n_{кр}, \quad (2.34)$$

або, беручи до уваги (2.33), маємо:

$$\alpha_{эф} \cdot x_{кр} \leq 18 + \ln \frac{(|E_0 - b \cdot \delta|)^3}{(\alpha_{эф} \cdot E_0)^2}. \quad (2.35)$$

Утворення *стримера* в однорідному електричному полі відповідає умові самостійності розряду і дозволяє при $x_{кр} = L$ визначити мінімальну пробивну напругу розрядного проміжку. Для цього задаємося значенням E_0 і визначаємо коефіцієнт ударної іонізації α з (2.13). Тоді згідно (2.35) обчислюємо критичну довжину лавини. При рівності $x_{кр} = L$ визначаємо для відповідного значення E_0 пробивну напругу розрядного проміжку $U_{пр} = E_0 \cdot L$.

Приклад 2.4	
<p style="text-align: center;">Умова:</p> <p>В повітряному розрядному проміжку з однорідним електричним полем:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 1-й випадок $E_0 = 35 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$; - 2-й випадок $E_0 = 30 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$ в залежності від погодних умов підтримується режим переходу лавинного розряду у стримерний. <p>Задані погодні умови температурою t і тиском p:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. $t = -40^\circ\text{C}$; $p = 750 \text{ мм рт. ст.}$; 2. $t = 0^\circ\text{C}$; $p = 730 \text{ мм рт. ст.}$; 3. $t = +30^\circ\text{C}$; $p = 715 \text{ мм рт. ст.}$ 	<p style="text-align: center;">Формули для розв'язування:</p> $\delta = 0,386 \cdot \frac{p [\text{мм рт. ст.}]}{273 + t [^\circ\text{C}]};$ $\frac{\alpha_{эф}}{\delta} = 0,2 \cdot \left(\frac{E_0}{\delta} - 24,5 \right)^2 [\text{см}^{-1}];$ $\alpha_{эф} \cdot x_{кр} \leq 18 + \ln \frac{(E_0 - b \cdot \delta)^3}{(\alpha_{эф} \cdot E_0)^2};$ $U_{пр} = E_0 \cdot x_{кр}.$
Запитання:	
Визначити критичні довжини лавини $x_{кр}$ та пробивні напруги $U_{пр}$ розрядного проміжку.	
Рисунок:	
Пояснення:	
Розв'язання:	
Порівняйте отримані результати для двох значень напруженості електричного поля.	
Відповідь:	

Підсумок

Процес наростання кількості електронів, які рухаються в електричному полі в напрямку до аноду, називається лавиною електронів.

У своєму розвитку лавина електронів розширюється внаслідок дифузії (руху із області підвищеної концентрації у область з пониженою концентрацією частинок) та електростатичного відштовхування.

При числі електронів $n \leq 10^4 \dots 10^5$ радіус лавини визначається в основному дифузією, а при $n \geq 10^5 \dots 10^6$ - електростатичним розштовхуванням.

Для того, щоб розряд став *самостійним* і міг існувати при відсутності зовнішнього іонізатора, необхідно, щоб у результаті розвитку початкової лавини з'явився хоча б один *вторинний* електрон (як результат дії низько енергетичного фотону чи іону) здатний зніціювати нову лавину.

Електрони нових лавин рухаються у проміжку, заповненому позитивними іонами. Вздовж шляху лавин газ у проміжку між електродами переходить у стан плазми - відбувається пробій проміжку.

Запитання

Опишіть механізм утворення лавини електронів. Що таке дифузійний радіус й радіус електростатичного розштовхування?

Яким чином можна визначати концентрацію позитивних іонів вздовж шляху розвитку лавини (по сліду лавини).

Яка умова того, щоб розряд став самостійним у результаті розвитку початкової лавини?

Що таке початкова напруга?

В чому різниця початкової напруги для слабо неоднорідного й сильно неоднорідного електричних полів?

Яким повинно бути число іонізацій, здійснюваних одним електроном на шляху між електродами розрядного проміжку, щоб розряд був самостійним?

ЛЕКЦІЯ 11

[2, с. 67–85; 3, с. 19–24; 5, с. 56–68; 6, с. 56–61; 8, с. 90–124]

2.8 Розвиток розряду у проміжках з однорідним електричним полем. Закон Пашена

Залежність значень *початкових* розрядних напруг U_0 від довжини проміжку L та тиску газу p може бути одержана з умови *самостійності розряду* у формі (2.31), оскільки ця умова стосовно проміжку з однорідним електричним полем означає його **пробій**.

Якщо взяти рівняння для α виду (2.8), підставити його в (2.31) і врахувати, що в однорідному полі $E_0 = E_p = \frac{U_0}{L}$, одержимо наступні співвідношення.

$$\begin{aligned} \alpha \cdot L &= K; \quad \alpha = A \cdot p \cdot \exp\left(-\frac{B}{E_0} \cdot p\right); \\ A \cdot p \cdot \exp\left(-\frac{B}{E_0} \cdot p\right) \cdot L &= A \cdot p \cdot L \cdot \exp\left(-\frac{B}{U_0} \cdot p \cdot L\right) = K; \\ \frac{A}{K} \cdot p \cdot L &= \exp\left(+\frac{B}{U_0} \cdot p \cdot L\right); \quad \ln\left(\frac{A}{K} \cdot p \cdot L\right) = \frac{B}{U_0} \cdot p \cdot L; \\ U_0 &= \frac{B \cdot p \cdot L}{\ln\left(\frac{A}{K} \cdot p \cdot L\right)}; \quad T = \text{const}. \end{aligned} \quad (2.36)$$

Рівняння (2.36) - це символічний вираз **закону Пашена**, названого на честь Фрідріха Пашена (німецький фізик-експериментатор; *Louis Karl Heinrich Friedrich Paschen*; 22.01.1865 - 25.02.1947 pp.), який першим у 1889 році встановив залежність $U_0 = f(p \cdot l)$ експериментальним шляхом.

Закон Пашена стверджує: при незмінній температурі *початкова напруга розряду* (пробивна напруга газу) в проміжку з *однорідним* електричним полем є функцією *добутку тиску газу на відстань між електродами*. Іншими словами, пробивна напруга не змінюється при пропорційному збільшенні відстані між електродами та зменшенні тиску. На рис.2.8 показана залежність (2.36) для повітря при сталій температурі.

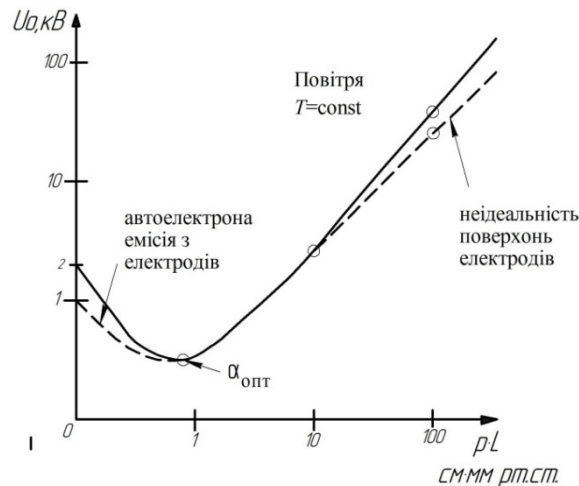


Рис. 2.8 - Крива закону Пашена $U_p = f(p \cdot l)$ для повітряного проміжку з однорідним електричним полем

Якщо прийняти $L = const$ при зменшенні тиску скорочується число іонізацій внаслідок зменшення кількості молекул (атомів) в одиниці об'єму; при збільшенні тиску - зменшується ймовірність іонізацій внаслідок зменшення довжини більшого пробігу. Тому в обох випадках для виконання умови самостійності розряду $\alpha \cdot L = K$ необхідно збільшувати напругу на проміжку. Мінімальному значенню U_{0min} відповідає оптимальне значення коефіцієнта ударної іонізації α_{opt} .

При значних тисках спостерігаються відхилення від закону Пашена, які полягають у зменшенні розрядних напруг внаслідок неідеальності поверхонь електродів і пов'язаних з ними місцевих збільшеннях напруженості електричного поля. Існують також інші причини зниження початкової розрядної напруги U_0 .

При дуже низьких тисках експериментальні значення розрядних напруг також нижчі від розрахованих згідно (2.36), що пов'язують із зміною механізму розряду: зростає внесок автоелектронної емісії з електродів.

Якщо прийняти тиск газу $p = const$ при збільшенні відстані між електродами напруженість електричного поля E зменшується. Для виконання умови самостійності розряду $\alpha \cdot L = K$ необхідно збільшення напруги, оскільки

залежність $\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right)$ не лінійна, а експоненційна, тобто зменшення коефіцієнта

ударної іонізації α більш сильніше, ніж зменшення напруженості електричного поля E . При зменшенні міжелектродної відстані L для забезпечення умови самостійності розряду також необхідно збільшувати напругу на розрядному проміжку, щоб підвищити ймовірність іонізації $p(x)$.

Координати мінімального значення початкової напруги U_{0min} можна знайти, якщо прирівняти до нуля першу похідну $\frac{\partial U_0}{\partial (p \cdot L)}$ рівняння (2.36). В

результаті матимемо:

$$(p \cdot L)_{min} = \frac{e}{A} \cdot K, \quad (2.37)$$

де $e \approx 2,71828$ - основа натурального логарифму.

Після підставлення значення (2.37) у рівняння (2.36) знайдемо вираз для *мінімальних* значень початкових напруг:

$$U_{0\min} = B \cdot (p \cdot L)_{\min} = B \cdot \frac{e}{A} \cdot K. \quad (2.38)$$

Цій *мінімальній* початковій напрузі $U_{0\min}$ відповідає мінімальна енергія, необхідна для іонізації газу.

Якщо тиск у розрядному проміжку й відстань між електродами залишити постійними ($p = \text{const}$; $L = \text{const}$), а *температуру газу* змінювати, початкова напруга також буде змінюватися, оскільки $p = \delta \cdot \frac{p_0}{T_0} \cdot T$ ($p_0 = 760 \text{ мм рт. ст.}$; $T_0 = 293 \text{ K}$). Рівняння (2.36) дозволить в цьому випадку підрахувати залежність початкової напруги самостійного розряду від температури: $U_0 = f(T)$.

З практичної точки зору найчастіше розглядають *три області тиску*: високі тиски ((5 ... 10) атм та більші); тиски, близькі до атмосферного; глибокий вакуум.

Високі тиски дають можливість *зменшення відстаней* в електродній системі і використовуються в конденсаторах, автоматичних вимикачах, спеціальних типах кабелів, електростатичних генераторах, вимірювальних приладах. Як *заповнювач* застосовують повітря або інертний газ, наприклад, *азот* (при розрядах не виникає небажаних хімічних реакцій), а також високоімічні гази: *фреон* ($C Cl_2 F_2$), *елегаз* ($S F_6$).

У вищенаведених випадках фігурує значення щільності повітря, розкид значень якого також впливає на початкову напругу.

Щільність повітря δ , яка відповідає нормальним умовам приймається за одиницю. Відносну густину повітря, яка відповідає тиску p , мм рт. ст. та температурі t , °C, знаходимо з виразу:

$$\delta = 0,386 \cdot \frac{p}{273 + t} \quad (2.39)$$

При малих відхиленнях щільності повітря від одиниці ($\delta = 1,0 \pm 0,1$) можна вважати, що розрядна напруга змінюється пропорційно щільності повітря:

$$U_p' = \delta \cdot U_p \quad (2.40)$$

де U_p' - розрядна напруга в умовах досліду;

U_p - розрядна напруга в нормальних умовах.

Зручний вираз для розрахунків розрядних напруг повітряних проміжків з однорідним електричним полем можна отримати, скориставшись значенням α з (2.13) та прийнявши в умові самостійності розряду $\alpha \cdot L = K = 8,2$:

$$\begin{aligned} \frac{0,2}{\delta} &= (E_0 - 24,5 \cdot \delta)^2 \cdot L = 8,2; \quad \sqrt{\frac{41 \cdot \delta}{L}} = E_0 - 24,5 \cdot \delta; \\ \frac{U_0}{L} &= 24,5 \cdot \delta + 6,4 \sqrt{\frac{\delta}{L}} \\ U_0 &= 24,5 \cdot \delta \cdot L + 6,4 \sqrt{\delta \cdot L} \quad [\text{кВ}] \end{aligned} \quad (2.41)$$

Вираз (2.41) спочатку був одержаний дослідним шляхом з дещо відмінними значеннями коефіцієнтів.

З (2.41) випливає, що

$$E_p = 24,5 \cdot \delta + 6,4 \sqrt{\frac{\delta}{L}} \quad (2.42)$$

При нормальних атмосферних умовах ($\delta = 1$) та $L=1 \text{ см}$ напруженість електричного поля при розряді в проміжку складає $E_p = 30,9 \text{ кВ}\cdot\text{см}^{-1}$. При збільшенні довжини розрядного проміжку напруженість поля E_p зменшується, наближаючись до $24,5 \text{ кВ}\cdot\text{см}^{-1}$.

2.9 Розвиток розряду у проміжках з неоднорідним електричним полем

Умова самостійності розряду виконується при *початковій* напруженості електричного поля. Для проміжків з *однорідним* електричним полем початкова напруга завжди *співпадає* з розрядною. Виконання умови самостійності розряду у проміжках з неоднорідним полем ще не означає їх пробій. В *слабо неоднорідних* полях ефективний коефіцієнт ударної іонізації $\alpha_{ef} \geq 0$ вздовж всієї довжини проміжку. Тому, при виконанні умови самостійності розряду проміжок пробивається і початкова напруга рівна розрядній. В *різко неоднорідних* полях $\alpha_{ef} \geq 0$ у вузькій зоні *поблизу електрода*, який є джерелом неоднорідності електричного поля, і при виконанні умови самостійності розряду виникає **корона**. В цьому випадку розрядна напруга може значно перевищувати початкову.

Ступінь неоднорідності електричного поля характеризується відношенням максимальної напруженості поля у розрядному проміжку $E_{\text{макс}}$ до середньої $E_{\text{ср}}$, і називається *коефіцієнтом k_n неоднорідності* поля:

$$k_n = \frac{E_{\text{макс}}}{E_{\text{ср}}}. \quad (2.43)$$

При коефіцієнті $k_n \leq 4$ електричне поле відноситься до слабо неоднорідного і відповідні проміжки називаються *некоронуючими*. Проміжки, в яких коефіцієнт $k_n > 4$, називаються *коронуючими* або проміжками з *різко неоднорідним* полем.

2.9.1 Умова самостійності розряду в слабо неоднорідному електричному полі

Розглянемо електричне поле *коаксиальних циліндрів*, геометричні розміри яких характеризують поле, як слабо неоднорідне (див. рис. 2.9.1).

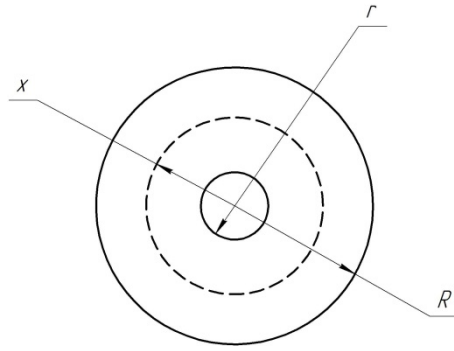


Рис. 2.9.1 - Система коаксиальних циліндрів

Напруженість електричного поля в проміжку між циліндрами описується рівнянням:

$$E(x) = \frac{U_0}{x \cdot \ln \frac{R}{r}} \quad (2.44)$$

де R та r – радіуси зовнішнього та внутрішнього циліндрів, відносно;
 x – радіальна координата.

Умова самостійності розряду при початковій напрузі U_0 у цьому випадку запишеться як:

$$\int_r^R \alpha(x) dx = K \quad (2.45)$$

Підставивши значення коефіцієнта ударної іонізації $\alpha(x)$ з виразу (2.8), одержуємо ($T = const$):

$$\begin{aligned} \int_r^R A \cdot p \cdot \exp \left[-B \cdot \frac{p}{E(x)} \right] dx &= \int_r^R A \cdot p \cdot \exp \left[-B \cdot \frac{p \cdot x \cdot \ln \frac{R}{r}}{U_0} \right] dx = K; \\ A \cdot p \cdot \frac{U_0}{B \cdot p \cdot \ln \frac{R}{r}} \cdot \exp \left[-\frac{B}{U_0} \cdot p \cdot x \cdot \ln \frac{R}{r} \right] \Big|_r^R &= K; \\ \frac{A}{B} \cdot \frac{U_0}{\ln \frac{R}{r}} \left[\exp \left(-\frac{B \cdot \ln \frac{R}{r}}{U_0} \cdot p \cdot r \right) - \exp \left(-\frac{B \cdot \ln \frac{R}{r}}{U_0} \cdot \frac{R}{r} \cdot p \cdot r \right) \right] &= K \end{aligned} \quad (2.46)$$

З рівняння (2.46) випливає, що початкові напруги в проміжку між коаксиальними циліндрами є функціями добутку $p \cdot r$ та відношення $\frac{R}{r}$. В загальному випадку, оскільки $r = R - L$, де L - довжина розрядного проміжку, можна записати:

$$U_0 = f \left(p \cdot L, \frac{R_1}{L}, \frac{R_2}{L}, \dots \right). \quad (2.47)$$

Вираз (2.47) - це скорочений запис **закону подібності розрядів** у проміжках: для *неоднорідного* електричного поля при незмінній температурі початкова напруга U_0 є функцією *добутку тиску газу* на один з геометричних *розмірів* проміжку (наприклад, r чи L) та відношень до цього розміру всіх інших геометричних розмірів, які визначають *форму* розрядного проміжку.

Легко бачити, що *закон Пашена* є частинним випадком закону подібності розрядів стосовно однорідного поля.

Розглянемо залежність *початкової напруги* U_0 від відношення радіусів внутрішнього та зовнішнього циліндрів $\frac{r}{R}$. При цьому вважатимемо значення R - незмінним.

З виразу $U_0 = E_0 \cdot r \cdot \ln \frac{R}{r}$ не можна отримати значення U_0 , оскільки лишається невідомим E_0 . Однак, можна знайти наближено відношення $\frac{r}{R}$, якому відповідає *найбільше* значення початкової напруги, прирівнявши до нуля похідну $\frac{\partial U_0}{\partial r}$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_0}{\partial r} &= E_0 \cdot \frac{\partial r}{\partial r} \cdot \ln \frac{R}{r} + E_0 \cdot r \cdot \frac{r}{R} \cdot \left(-\frac{R}{r^2} \right) = 0; \\ \ln \frac{R}{r} &= 1; \quad e^1 = \frac{R}{r}. \end{aligned} \quad (2.48)$$

Звідси отримуємо, що $U_{0, \text{макс}}$ розміщується при абсцисі $\frac{r}{R} = \frac{1}{e}$ (e - основа натурального логарифму). На рис 2.9.2 подана експериментальна залежність $U_0 = f\left(\frac{r}{R}\right)$ при $R = 10$ см. З неї витікає, що $U_{0, \text{макс}}$ відповідає значенню $\frac{r}{R} \approx \frac{1}{3}$.

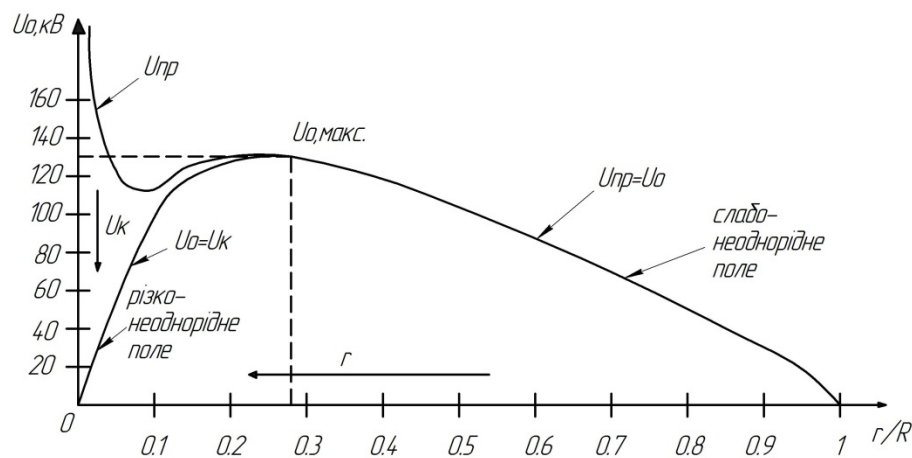


Рис. 2.9.2 - Початкові U_0 та пробивні E_{np} напруги повітряного проміжку між коаксіальними циліндрами ($R = 10$ см)

Справа від $U_{0, \max}$ знаходиться область *слабо неоднорідного* поля, у якій початкова напруга рівна пробивній, а зліва - область *різко неоднорідних полів*, в якій пробивна напруга перевищує, а при малих $\frac{r}{R}$ - значно, початкову напругу.

Рівняння (2.46) отримане для *слабо неоднорідного поля*, оскільки при його виводі вийшли з допущення, що вздовж всього проміжку між циліндрами $\alpha \geq 0$.

2.9.2 Розряд у коронуючому проміжку

В коронуючих проміжках з *різко неоднорідним електричним полем* коефіцієнт ударної іонізації $\alpha \geq 0$ тільки на частині проміжку і умова самостійності розряду виконується лише на ділянці від внутрішнього електрода до границі зони коронування (див. рис. 2.9.3):

$$\int_r^{r_k} \alpha(x) dx = K, \quad (2.49)$$

де r_k - радіус зони коронування («чохла» корони).

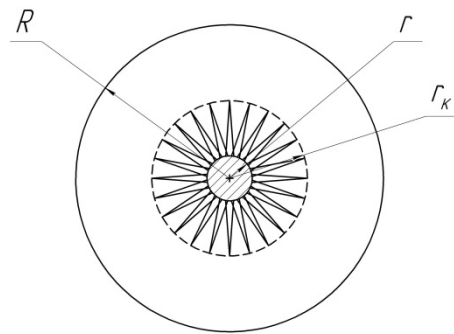


Рис. 2.9.3 - Зона коронування в системі коаксиальних циліндрів

У виразі (2.49) невідомими є r_k та $\alpha(x)$.

З (2.44) витікає, що при зміні x від r до r_k й зафіксованих значеннях U , R та r :

$$U = const; r = const; R = const: \quad \frac{U}{\ln \frac{R}{r}} = E_x \cdot x = E_r \cdot r = E_k \cdot r_k \quad (2.50)$$

де E_r - напруженість поля біля внутрішнього електрода;

E_x - напруженість у точці з координатою x ;

E_k - напруженість на границі зони коронування.

Скористаємося виразом (2.13) у загальному виді: $\alpha(x) = \frac{a}{\delta} \cdot (E_x - b \cdot \delta)^2$, де a та b - постійні; δ - щільність газу.

Оскільки на границі зони коронування $\alpha = 0$, то $E_k = b \cdot \delta$, а значить, у відповідності з рівняннями E_r та E_k виразу (2.50) маємо:

$$r_k = r \cdot \frac{E_r}{E_k} = r \cdot \frac{E_r}{b \cdot \delta}; \quad E_x = E_r \cdot \frac{r}{x}; \quad \frac{E_x}{\delta} = \frac{E_r \cdot r}{\delta \cdot x}.$$

Із врахуванням цього умова самостійності розряду (2.49) набуває вигляду ($E_r = E_0$):

$$\int_r^{\frac{r \cdot E_0}{b \cdot \delta}} a \cdot \delta \cdot \left(\frac{E_0 \cdot r}{\delta \cdot x} - b \right)^2 dx = K. \quad (2.51)$$

Після інтегрування та перетворень отримаємо рівняння самостійного розряду в коронуючому проміжку (з рідко неоднорідним електричним полем):

$$\left(\frac{E_0}{b \cdot \delta} \right)^2 - 2 \cdot \frac{E_0}{b \cdot \delta} \cdot \ln \frac{E_0}{b \cdot \delta} - 1 = \frac{K}{a \cdot b^2 \cdot \delta \cdot r}. \quad (2.52)$$

Розв'язок рівняння (2.52) типу $E_0 = E_0(r)$ проводиться в наступному порядку:

- задаємось значенням r ;
- при заданій відносній густині газу δ з (2.52) знаходимо E_0 ;
- згідно рівняння $U_0 = E_0 \cdot r \cdot \ln \frac{R}{r}$ визначаємо початкову напругу самостійного розряду U_0 .

На рис. 2.10 наведені в залежності від $\delta \cdot r$ відносні значення $E_0 \cdot r = \frac{U_0}{\ln \frac{R}{r}}$

для повітря при різних відношеннях радіусів зовнішнього і внутрішнього циліндрів.

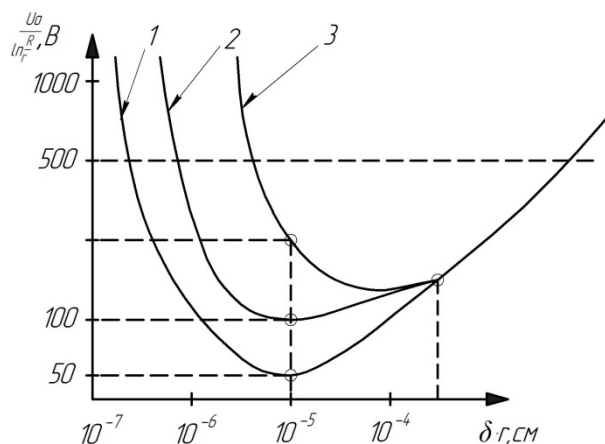


Рис. 2.10 - Залежність початкової напруги $\frac{U_0}{\ln \frac{R}{r}}$ від значень $\delta \cdot r$

при різних відношеннях радіусів циліндрів:

$$1) \frac{R}{r} = 120; \quad 2) \frac{R}{r} = 30; \quad 3) \frac{R}{r} = 15$$

Як бачимо, при $\delta \cdot r \geq 10^{-4} [\text{см}]$ початкова напруженість поля не залежить від радіуса зовнішнього циліндра в сильно неоднорідному електричному полі.

2.9.3 Розвиток розряду в стандартних розрядних проміжках

На рис. 2.11 подані характерні криві напруг пробую й коронного розряду для розрядного проміжку у вигляді **двох паралельних проводів** (для прикладу, розрядний проміжок утворений двома мідними полірованими провідниками діаметром $2r = 0,825 \text{ см}$; щільність повітря $\delta = 1$).

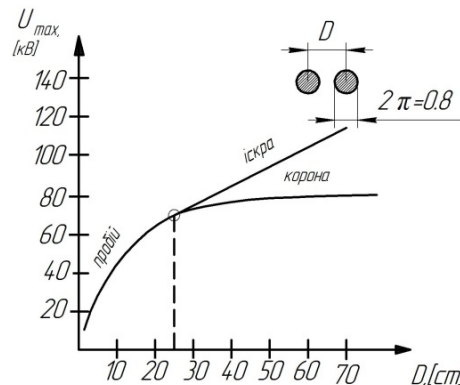


Рис. 2.11 - Залежності пробивної напруги та напруги коронного розряду від відстані між осями двох паралельних провідників

До відстані між проводами $D \leq 30 \cdot r$ пробій проміжку відбувається *без корони*. Для $D > 30 \cdot r$ спочатку з'являється стійка корона і тільки збільшення напруги викликає перехід корони у *іскрове перекриття* між проводами. Напруженість електричного поля і напругу, при яких з'являється *видима корона* на проводах, можна обчислити з виразів:

$$E_{к.макс} = 30 \cdot \delta \cdot m \cdot \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{r \cdot \delta}} \right) [\text{кВ} \cdot \text{см}^{-1}], \quad (2.53)$$

$$U_{к.макс} = E_{к.макс} \cdot r \cdot \ln \frac{D}{r} [\text{кВ}], \quad (2.54)$$

де m – коефіцієнт, який враховує стан поверхні проводів: шорсткість (негладкість), зволоженість та забрудненість. Для ідеально гладкої поверхні $m = 1$; для нерівної та забрудненої поверхні $m \leq 0,8$.

Напругу пробую (*іскрового перекриття*) при $D > 30 \cdot r$ обчислюють з виразу:

$$U_{пр.макс} = 30 \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{0,01}{\sqrt{r \cdot \delta}} \cdot \frac{D}{r} \right) \cdot r \cdot \ln \frac{D}{r} [\text{кВ}]. \quad (2.55)$$

Для **кульового проміжку** (див. рис. 2.17) при відстанях $s \leq 4 \cdot r$ між *поверхнями куль* радіуса r спостерігається тільки *іскрове перекриття* без корони; при відстанях $4 \cdot r \leq s \leq 8 \cdot r$ *корона*, що з'являється, без збільшення напруги відразу переходить в *іскру*; починаючи з відстаней $s \geq 8 \cdot r$, *корона* утримується стійко і переходить в *іскру* після подальшого збільшення напруги.

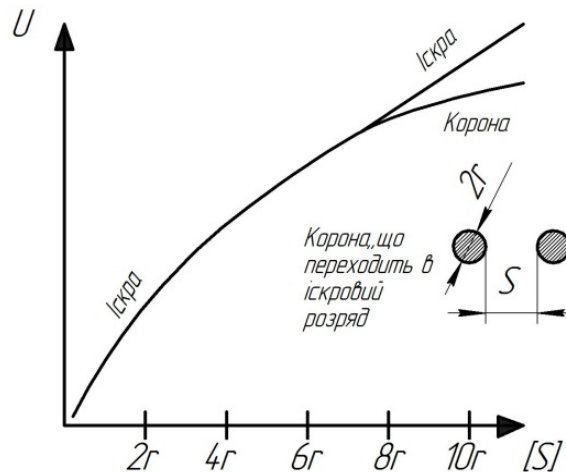


Рис. 2.12 - Залежності напруги коронного та іскрового розрядів для кульового проміжку при промисловій частоті

При відстанях між кулями $0,54 \cdot \sqrt{r} \leq s \leq 2 \cdot r$ пробивна напруга майже пропорційна відстані між поверхнями куль s і може бути обчислена з виразу:

$$U_{пр макс} = E_{пр} \cdot \frac{s}{f\left(\frac{s}{r}\right)} = 27,2 \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{0,54}{\sqrt{r \cdot \delta}}\right) \cdot \frac{s}{f\left(\frac{s}{r}\right)} [\text{кВ}], \quad (2.56)$$

де $f\left(\frac{s}{r}\right) = 0,25 \cdot \left[\frac{s}{r} + 1 + \sqrt{\left(\frac{s}{r} + 1\right)^2 + 8}\right]$ – коефіцієнт неоднорідності електричного поля (див. розділ I).

Слід мати на увазі, що формула (2.56) дійсна тільки для *змінного* струму промислової частоти.

Типова крива напруг пробою для **проміжку «куля–площина»** подана на рис. 2.13. При малих відстанях s між кулею радіуса r й площиною розряд у вигляді пробою відбувається без утворення коронного розряду, що характерне для рівномірного електричного поля. При цьому середнє значення пробивної напруженості електричного поля зменшується пропорційно збільшенню відстані між електродами.

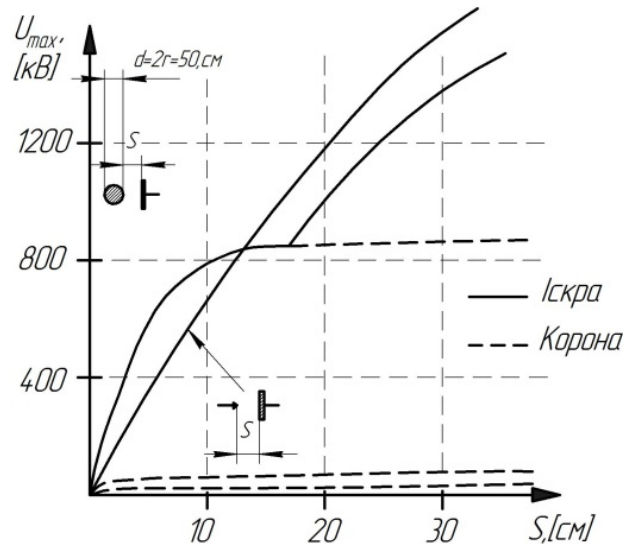


Рис. 2.13 - Залежності напруги коронного розряду та пробивних напруг розрядних проміжків : «куля–площина» й «стрижень–площина» на промисловій частоті

Для відстаней $s \leq r$ пробивні напруженості такі ж, як і для рівномірного електричного поля $E_{np} = (25 \dots 30) \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$. При відстанях $s = 6 \cdot r \dots 8 \cdot r$ середня пробивна напруженість складає усього лише $E_{np} = (4 \dots 5) \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$ і майже не зменшується. Крива залежності $U_{np} = (s)$ має характерний злам, причому для відстаней до точки зламу корона зливається з розрядом між електродами; при більших відстанях між електродами розряду передуює корона.

На тому ж рис. 2.13 подана крива залежності розрядних напруг від відстаней для розрядного проміжку «стрижень–площина». Коронна напруга для цього проміжку набагато менша розрядної і крива $U_k = (s)$ у масштабі рисунка 2.13 майже зливається з віссю абсцис. Крива розрядних напруг $U_{np} = (s)$ для електродів «стрижень–площина» майже співпадає з кривою для електродів «куля–площина» після точки розгалуження.

2.9.4 Розряд у проміжку «стрижень–площина» при різнополярній напрузі

Початкова напруга розрядного процесу при *позитивній* полярності електрода, з якого відбувається розряд, дещо більша, ніж при негативній полярності. Пояснюється це тим, що при розвитку розряду з *негативного* електрода коефіцієнт вторинної іонізації γ більший, ніж при позитивній полярності електрода, оскільки в цьому випадку його значення визначається фотоіонізацією в об'ємі, а також фотоіонізацією з електрода.

Пробій коронуючого проміжку відбувається при напрузі, більшій від початкової. Якщо розрядний проміжок *несиметричний*, тобто його електроди мають різні радіуси кривизни, то пробивна напруга U_{np} залежить від полярності електрода з *меншим* радіусом кривизни: при негативній полярності вона суттєво вища, ніж при позитивній (див. рис. 2.14).

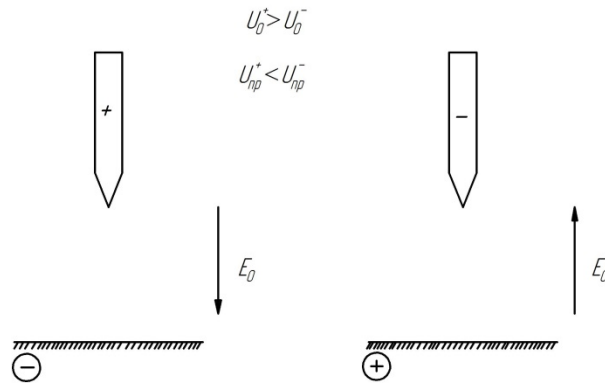


Рис. 2.14 - Схеми початкових стадій розвитку розряду з позитивного й негативного електродів

Пояснюється це тим, що при *позитивній полярності* рухливі електрони легко виходять із зони розряду на електрод (+), а позитивний об'ємний заряд, що залишився, *підсилює* напруженість електричного поля у зовнішній частині проміжку, сприяючи подальшому розвитку розряду. При *негативній полярності* навпаки, малорухливий позитивний об'ємний заряд *зменшує* напруженість поля у зовнішній частині проміжку, що вимагає для розвитку розряду значно більшої напруги. Середні розрядні напруженості при позитивній полярності стрижня складають $E_+ \sim 4,5 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$, а при негативній полярності $E_- \sim 10 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$ однак це істотно менше (в 3 ... 5 разів), ніж при розрядах в однорідному полі.

Напруженість електричного поля безпосередньо *біля стержня* набагато вища від середнього значення і сягає величин $E_{\pm} \sim (30 \dots 100) \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$. При нормальному атмосферному тиску повітря в полях високої напруженості відбувається *розвал* негативних іонів кисню, що також є джерелом ефективних електронів. Справді, відрив електрона від молекулярного іона кисню O_2^- відбувається при $\frac{E}{p} \geq 45 \text{ В} \cdot (\text{см} \cdot \text{мм рт.ст.})^{-1}$ або при нормальному тиску при напруженості електричного поля $E \geq 35 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$.

Внаслідок великого значення коефіцієнта ударної іонізації α в сильному електричному полі лавини мають малу критичну довжину. Тому, найбільш потужна лавина практично відразу ж перетворюється у стример. Позитивний стример несе великий надлишковий заряд, а від'ємний - суттєво менший, оскільки позитивні іони повільніше, ніж електрони, рухаються вздовж стримерного каналу до електрода.

Якщо внести в несиметричне поле бар'єр (тонкий шар твердого діелектрика), відбувається перерозподіл силових ліній електричного поля і електрична міцність проміжку збільшується. Цей метод знайшов застосування в прохідних ізоляторах, кабелях, трансформаторах та ін. конструкціях.

Утворення лідера і головного розряду.

З ростом прикладеної до проміжку «стрижень–площина» напруги довжина

стримера збільшується, зростає ємність між стримером та протилежним електродом. Це викликає *збільшення струму* в каналі стримера і його розігрів. В результаті різних *електрофізичних* та *термодинамічних* процесів провідність каналу стримера різко (на два порядки) зростає і він переходить в канал розряду, який називається *лідером*. Концентрація заряджених частинок в каналі лідера значно вища, ніж у каналі стримера, тому падіння напруги на ньому менше, що сприяє його руху до протилежного електрода. Оскільки для нагріву каналу розряду необхідний деякий час, швидкість руху лідера суттєво менша швидкості розвитку стримерів і має порядок $\sim 10^6 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$.

При наближенні лідера до площини напруженість електричного поля у ще не пробитій частині проміжку різко зростає. Виникає інтенсивна іонізація, яка перетворює газ у цій частині проміжку в *плазму* з більш високою концентрацією заряджених частин, ніж в каналі лідера. Велика напруженість електричного поля на границі утвореного високоіонізованого каналу та каналу лідера викликає розповсюдження зони інтенсивної іонізації по напрямку *до стержня* з швидкістю $\sim 10^9 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$. Цей процес, який супроводжується яскравим спалахом каналу та проходженням вздовж нього імпульсу великого струму, називається **головним розрядом**.

При змінній напрузі частотою 50 Гц найменшу електричну міцність має проміжок «стрижень–площина». Розрядні напруги цього проміжку дещо нижчі, ніж при постійній напрузі додатної полярності, внаслідок деякого підсилення електричного поля біля стержня зарядами, які залишились у проміжку від попереднього півперіоду напруги.

Проміжок «стрижень–стрижень» має більш високу міцність, оскільки електричне поле у ньому більш рівномірне.

2.9.5 Практичне застосування результатів замірів стандартних розрядних проміжків

Важливе практичне значення має та обставина, що в різко неоднорідному електричному полі величина пробивної (але не коронної) напруги майже не залежить від форми електродів, а залежить лише від відстані між ними. Так, пробивні напруги для електродів «стрижень-площина» є найменшими із розрядних напруг для всіх можливих систем електродів, які зустрічаються на практиці, при однакових відстанях між ними. Тому можна вважати, що розрахунок конструкції деякого повітряного проміжку проводиться для найбільш несприятливого випадку. Величини пробивних напруг отримаємо меншими від істинних, а відстані між деталями конструкції - із запасом.

Поправки величини пробивних напруг, обумовлені коливаннями щільності повітря, враховуються відомим коефіцієнтом $\delta = 0,386 \cdot \frac{p}{T}$. Крім цього, слід враховувати вплив вологості повітря, незначний при розряді в однорідному полі і значний - в неоднорідному. У вологому повітрі молекули водяної пари захоплюють електрони, утворюючи *негативні іони*. Рухливість зв'язаного електрону різко зменшується, як і іонізуюча здатність. Тому із збільшенням вологості електрична міцність проміжку збільшується, т.я. кількість зв'язаних

електронів росте.

При нормальній абсолютній вологості ψ_n повітря в 1 см^3 міститься майже 11 г водяних парів, що відповідає парціальному тиску $11,44 \text{ мм рт. ст.}$ Цю вологість приймають за одиницю ($\mu = 1$) і до неї відносять результати замірів. Перерахунок здійснюється перемноженням заміряного значення пробивної напруги U_B на поправковий коефіцієнт:

$$U' = U_B \cdot k; \quad k = 1,15 - 0,15 \cdot \mu, \quad (2.57)$$

де $\mu = \frac{\psi_a}{\psi_n}$ - відносна вологість, рівна відношенню абсолютної вологості ψ_a при замірі напруги пробою до нормальної абсолютної вологості ($11,0 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$).

Підсумок

Згідно стримерної теорії умовою самостійності розряду в однорідному електричному полі є перехід лавинного розряду у *стример* - канал, заповнений *плазмою*, який при подальшому розвитку розряду переходить в канал ще більшої провідності - *головний розряд*, що замикає розрядний проміжок накоротко. Прискорюючим фактором є наявність високоенергетичних фотонів, які іонізують газ перед лавиною. Початкова напруга рівна розрядній.

В різко неоднорідному електричному полі умова самостійності розряду виконується в дуже вузькій зоні поблизу електрода, який створює неоднорідність поля. Іонізаційні процеси концентруються в цій зоні і створюють характерне свічення - *коронний розряд* або *корону*. Початкова напруга відповідає напрузі виникнення коронного розряду. Пробій коронуючого проміжку відбувається при напрузі, значно більшій від своєї початкової.

Залежність значень початкових розрядних напруг від довжини проміжку та тиску газу може бути одержана з *умови самостійності розряду*, оскільки ця умова стосовно проміжку з однорідним електричним полем означає його пробій.

Закон Пашена стверджує: при незмінній температурі початкова напруга розряду (пробивна напруга газу) в проміжку з однорідним електричним полем є функцією добутку тиску газу на відстань між електродами.

Отриманий вираз для *мінімальних* значень початкових напруг, яким відповідає мінімальна енергія, необхідна для іонізації газу.

Високі тиски дають можливість зменшення відстаней в електродній системі і використовуються в конденсаторах, автоматичних вимикачах, спеціальних типах кабелів, електростатичних генераторах, вимірювальних приладах.

Закон подібності розрядів у проміжках з *неоднорідним* електричним полем: при незмінній температурі початкова напруга є функцією *добутку тиску газу* на один з геометричних *розмірів* проміжку та відношень до цього розміру всіх інших геометричних розмірів, які визначають *форму* розрядного проміжку.

В коронуючих проміжках з *різко неоднорідним* електричним полем коефіцієнт ударної іонізації більший нуля тільки на частині проміжку і умова

самостійності розряду виконується лише на ділянці від внутрішнього електрода до границі зони коронування.

При $\delta \cdot r \geq 10^{-4}$ [см] початкова напруженість поля не залежить від радіуса зовнішнього циліндра в сильно неоднорідному електричному полі.

Запитання

Який процес розвитку самостійного розряду в однорідному електричному полі згідно лавинної теорії?

Який процес розвитку самостійного розряду в однорідному електричному полі згідно стримерної теорії?

З чого складається тривалість формування головного розряду в однорідному електричному полі?

Яка особливість розрядного процесу в різко неоднорідному електричному полі? Чому рівна початкова напруга розряду?

Як можна визначити мінімальну розрядну напругу проміжку з однорідним електричним полем?

Яку закономірність встановлює закон Пашена?

Яка причина відхилень від закону Пашена в слабих і сильних тисках при фіксованій відстані між розрядними електродами?

Наведіть приклади електроустановок з високими тисками?

Який ефект можна спостерігати при виконанні умови самостійності розряду в різко неоднорідному електричному полі?

Дайте визначення закону подібності розрядів у неоднорідному електричному полі. Чому закон Пашена можна вважати його частинним випадком?

ТЕМА 7. КОРОННИЙ РОЗРЯД НА ПРОВОДАХ ПОВІТРЯНИХ ЛЕП

Лекція 12

[2, с. 165–182; 5, с. 68–76; 7, с. 46–64; 8, с. 125–159]

2.10 Коронний розряд на проводах повітряних ЛЕП

2.10.1 Коронний розряд і його характеристики

Коронний розряд або **корона** - це *самостійний розряд*, який виникає в *різко неоднорідних полях*, де іонізаційні процеси можуть відбуватися лише у вузькій області *поблизу електродів*. До такого роду полів відноситься і електричне поле проводів повітряних ліній електропередачі (ЛЕП).

Початкова напруженість електричного поля коронного розряду визначається для проводів радіуса r_0 [см] та щільності повітря δ згідно виразу:

$$E_{0k} = 24,5 \cdot m \cdot \delta \cdot \left[1 + \frac{0,65}{(\delta \cdot r_0)^{0,38}} \right] \left[\text{кВ} \cdot \text{см}^{-1} \right], \quad (2.53)$$

яка справедлива при *від'ємній* полярності проводу, однак може використовуватись і при *додатній* полярності, оскільки вплив полярності при утворенні корони невеликий.

Для системи *паралельних* провідників малих радіусів проводів ($r_0 \leq 1$ см) до теперішнього часу актуальною залишається *формула Піка* (1911–1915 рр., «Peek's law») - запропонований американським вченим–електротехніком *Піком Франком Вільямом* (1881–1933 рр.) емпіричний вираз:

$$E_{0k} = 30,3 \cdot m \cdot \delta \cdot \left[1 + \frac{0,298}{\sqrt{\delta \cdot r_0}} \right] \left[\text{кВ} \cdot \text{см}^{-1} \right]. \quad (2.54)$$

Тут при визначенні початкової напруженості коронного розряду коефіцієнт шорсткості $m = m_1 \cdot m_2$ враховує як форму поверхні витого проводу ($m_1 = 0,82 \dots 0,94$ в залежності від марки проводу), так і погодні умови (m_2). Проведеними розрахунками підтверджена можливість використання цієї формули для розрахунку коронного розряду на ЛЕП номіналом до 750 кВ з проводами радіуса 1,6 ... 1,8 см, наприклад, для сталевалюмінієвого проводу марки АС 550/71 з розрахунковим радіусом 1,62 см.

При коронному розряді в результаті іонізації повітря біля поверхні проводу утворюються частинки *обох знаків*. Під дією електричного поля у зоні, де відсутня іонізація повітря, відбувається рух до землі об'ємного заряду *того ж знаку*, що й полярність напруги на проводі (див. рис. 2.11).

Так як об'ємний заряд при будь-якій полярності проводу *виноситься* (рухається) від проводу до землі, напруженість електричного поля в «чохлі» корони і заряд біля поверхні проводу зменшується. Зменшення радіуса об'ємного заряду біля поверхні проводу зумовлює підвищення напруженості електричного поля на поверхні «чохла» **корони і збільшення** при цьому іонізації

повітря. Об'ємний заряд поблизу проводу поновлюється з нього, радіус «чохла» корони збільшується, а напруженість електричного поля зменшується до рівня початкової $E_{0к}$. Таким чином, внаслідок безперервного видалення об'ємного заряду від проводу *уніполярний коронний розряд* може підтримуватися як завгодно довго.

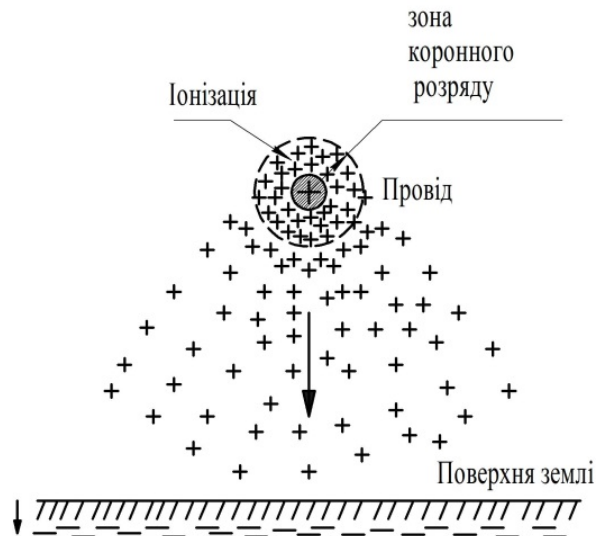


Рис. 2.11 Розподіл об'ємного заряду при *уніполярній* короні на проводі ЛЕП

Рух іонів під дією сил електричного поля утворює *струм* у проміжку між коронуючим проводом і землею. Для цього необхідні *витрати* енергії, які і визначають, в основному, втрати енергії на корону, оскільки втрати електричної енергії на іонізацію повітря набагато менші.

Для проводів *великого діаметра* напруженість електричного поля із збільшенням віддалі від поверхні проводу, зменшується повільно. Тому зона іонізації має великі розміри. При цьому навіть для початкових напруг утворені іонізовані лавини можуть досягти критичної довжини - корона відразу виникає у *стримерній* формі; структура зони іонізації дискретна, світяться багаточисленні *стримерні канали*.

На проводах *малих діаметрів* (менше 1 см) напруженість електричного поля з віддаленням від поверхні проводу різко зменшується; зона іонізації досить вузька і однорідна; корона виникає в *лавинній* формі; світіння зосереджене у вузькому каналі вздовж поверхні проводу - у «чохлі». При збільшенні напруги понад *початкову* розміри зони іонізації зростають і корона з лавинної форми переходить у стримерну.

Струм *стримерної корони* складається з окремих імпульсів струму з дуже крутим фронтом (тривалість фронту $\tau_f \sim 10$ нс). Ця високочастотна складова струму корони є джерелом інтенсивного електромагнітного випромінювання з широким спектром частот, яке створює радіо - та телезавади. При коронуванні проводів ліній надвисокої напруги може також виникати звуковий ефект, який особливо сильний при дощі.

При коронуванні двох різнойменно заряджених проводів (див. рис. 2.12) іони різних знаків рухаються назустріч один одному. В області пониженої

напруженості електричного поля - *посередині* - відбувається часткова *рекомбінація* іонів. Значна ж їх частина досягає зони корони протилежної полярності, підсилюючи там електричне поле. В результаті цього інтенсивність іонізації зростає, струм корони, а відповідно, і втрати енергії на корону збільшуються. Такий режим коронування називається *біполярною короною*.

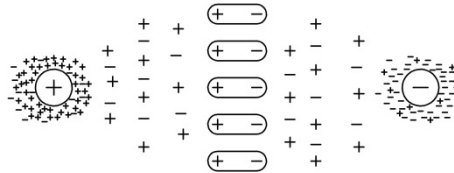


Рис. 2.12 Розподіл об'ємних зарядів при біполярній короні на проводах ЛЕП

При *змінній напрузі* корона запалюється в момент, коли напруженість електричного поля біля проводу досягає значення E_0 , і горить доти, поки напруга не досягне максимуму. Після цього, як тільки напруженість поля біля проводу стане нижчою E_0 , - корона гасне. Оскільки іони мають малу рухливість, напруженість поля біля проводу кожного наступного півперіоду підсилюється об'ємним зарядом, який залишився від попереднього півперіоду; миттєве значення напруги, при якій корона запалюється кожного наступного півперіоду (напруга запалювання), менше від початкової напруги (див. рис. 2.13).

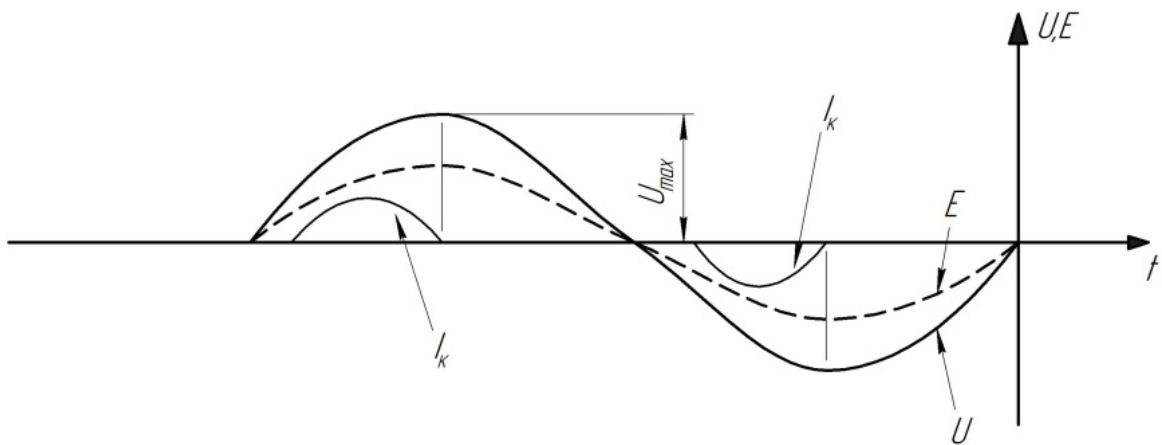


Рис. 2.13 Криві напруги, струму корони та напруженості електричного поля при коронному розряді

Слід зазначити, що шлях, який проходять іони за півперіоду, складає лише малу частину відстані між проводами. Наприклад, при радіусі проводів $r = 1,25 \text{ см}$ та відстані між проводами $D = 600 \text{ см}$ у лінії електропередачі з номінальною напругою $U_{ном} = 220 \text{ кВ}$ об'ємні заряди за півперіоду встигають відійти від проводу всього лиш на відстань 40 см .

Залежність напруги запалювання коронного розряду від амплітуди напруги на проводі називається *характеристикою запалювання корони*. Чим вища напруга на проводі, тим більше напруга запалювання відрізняється від початкової напруги. При *змінній напрузі* коронування проводів більш інтенсивне, ніж при *постійній напрузі*, і при рівних умовах втрати енергії на

корону *суттєво вищі*.

На характеристики коронного розряду - початкову напругу, втрати енергії, радіозавади - значний вплив справляють *погодні умови*. Атмосферні опади підсилюють напруженість електричного поля біля проводу, утворюючи на його поверхні водяні або льодяні виступи та вістря. Початкова напруга корони при цьому різко знижується. Прийнято зміну стану проводу при атмосферних опадах враховувати через коефіцієнт шорсткості проводу.

Для оцінки напруженості згідно (2.53) коефіцієнт шорсткості проводу $m_2 = 0,60$ при *інії, ожеледі та паморозі*. В умовах *дощу або снігу* в залежності від інтенсивності опадів коефіцієнт шорсткості приймається в межах $m_2 = 0,57 \dots 0,73$.

2.10.2 Способи зменшення витрат енергії на корону

Для того, щоб виключити втрати енергії на корону, а також радіозавади, *початкова* напруга корони повинна бути не нижчою найбільшої робочої напруги лінії електропередачі відносно землі. Забезпечити цю умову вибором діаметра $2r$ проводу можна тільки для умов *сухої погоди*. При атмосферних опадах виключити коронування проводів неможливо.

Оскільки ясна погода на території країни складає протягом року (60 ... 80)% річного часу (5560 ... 7000 з 8760 год.), *діаметр проводів* вибирають з умови виключення корони у *ясну погоду*.

З (2.54) прийемо для спрощення $E_{0k} = 30,3 \cdot m \cdot \delta$. Тоді з врахуванням того, що для повітряних ліній електропередачі $2H \approx D$, матимемо

$$U_0 = E_0 \cdot r \cdot \ln \frac{2H}{r} \Big|_D^D \approx E_0 \cdot r \cdot \ln \frac{2H \cdot D}{2H \cdot r} \approx 30,3 \cdot m \cdot \delta \cdot r \cdot \ln \frac{D}{r} [\text{кВ}], \quad (2.55)$$

де H – висота підвісу проводів, *см*;

D – середньгеометрична відстань між фазами, *см*.

Умова *відсутності* коронного розряду:

$$30,3 \cdot m \cdot \delta \cdot r \cdot \ln \frac{D}{r} \geq \frac{U_{\text{ном}} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}}. \quad (2.56)$$

Так, для ЛЕП на номінальну напругу 110–220 кВ, приймаючи $m_2 = 0,8$; $\delta = 1$; $\ln \frac{D}{r} \approx 6,2$, одержимо:

$$d \geq 0,011 \cdot U_{\text{ном}} \quad (2.57)$$

або $d_{110} \geq 1,2$ *см* та $d_{220} \geq 2,4$ *см* в *ясну погоду* при *нормальних* атмосферних умовах.

При номінальних напругах 330 кВ та вищих необхідні проводи ще більшого діаметру. В багатьох випадках вони значно перевищують діаметри проводів, вибрані з умови передачі необхідної потужності. На практиці застосовують проводи, площа поперечного січення провідного матеріалу яких, не залежить від їх діаметра. Це так звані *розширені проводи*. Вони мають діаметр, при якому забезпечується необхідне зниження напруженості електричного поля на їх поверхні, а для скорочення площі поперечного січення

проводи виготовляються порожнистими або із склопластиковою серцевиною.

Інше рішення, яке знайшло широке розповсюдження, було запропоноване ще у 1910 році академіком В.Ф. Міткевичем і полягає у **розщепленні проводів** фаз. В цьому випадку кожна фаза лінії електропередачі складається замість одного проводу великого діаметра з декількох паралельних проводів відносно малого діаметра, з'єднаних електрично між собою. В такій конструкції фази вдається при заданому січенні проводів істотно зменшити максимальну напруженість поля на їх поверхні (див. розділ I). Вирішальним є те, що заряд кожного проводу q_{np} , складає тільки частину загального заряду розщепленої фази

q_ϕ : $q_{np} = \frac{q_\phi}{n} = \frac{C_{\phi p} \cdot U_\phi}{n}$, де n – число проводів у фазі; $C_{\phi p}$ – ємність одиниці

довжини розщепленої фази; U_ϕ – фазна напруга.

Якщо проводи розміщуються на рівних відстанях a по колу радіуса R (див. рис. 1.11), то в трифазній системі ємність розщепленої фази визначиться як:

$$C_{\phi p} = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0}{\ln \frac{D}{r_e}}, \quad (2.58)$$

де D – середньгеометрична відстань між фазами, см;

r_e – еквівалентний радіус одиничного проводу, який має ту ж ємність, що й розщеплена фаза (див. (1.47)), см.

Середня робоча напруженість електричного поля на поверхні проводів розщепленої фази із врахуванням (2.58) визначатиметься як:

$$E_{cp} = \frac{q_{np}}{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r_0} = \frac{U_\phi}{n \cdot r_0 \cdot \ln \frac{D}{r_e}} \left[\text{кВ} \cdot \text{см}^{-1} \right], \quad (2.59)$$

а *максимальна* – згідно (1.46) як $E_{\max} = k \cdot E_{cp} = \left(1 + \gamma \cdot \frac{r_0}{a} \right) \cdot E_{cp}$, де

$\gamma = 2(n-1) \cdot \sin \frac{\pi}{n}$ входить у коефіцієнт k , який враховує підсилення

напруженості електричного поля внаслідок впливу зарядів на сусідніх проводах розщепленої фази.

Найбільш суттєвий вплив на максимальну напруженість електричного поля на поверхні розщепленої фази справляє діаметр розщеплення фази $2R = 2R(a, n)$. При збільшенні радіуса розщеплення R зменшується вплив зарядів сусідніх проводів, але збільшується ємність фази і, відповідно, її заряд. Тому існує оптимальний радіус розщеплення R_{opt} , при якому максимальна напруженість стає *мінімальною*.

2.10.3 Розрахунок втрат потужності на місцеву корону

Збільшенням діаметра проводів та зниженням напруженості електричного поля на їх поверхні неможливо позбутися коронного розряду при несприятливих погодних умовах. Більш того, навіть при ясній погоді не можливо позбутися

коронного розряду, наприклад, у місцях пошкодження поверхні проводу та арматури гірлянд ізоляторів, на елементах кріплення, тобто у точках місцевого підсилення напруженості електричного поля. Таку корону називають місцевою на відміну від загальної корони, яка існує вздовж всієї поверхні проводів при напруженості $E \geq E_0$.

Оскільки річні витрати енергії на корону складають помітне значення і можуть сягати 40% втрат на нагрів проводів, вони істотно впливають на техніко-економічні характеристики ЛЕП і їх необхідно оцінювати.

Оцінка втрат енергії на місцеву корону здійснюється на основі експериментально отриманих результатів випробувань. Великого розповсюдження набув емпіричний вираз Франка Піка, який без змін використовується донині:

$$P_k = \frac{241}{\delta} \cdot (f + 25) \cdot \sqrt{\frac{r}{D}} \cdot (U_\phi - U_0)^2 \cdot 10^{-5} \left[\text{кВт} \cdot \text{км}^{-1} \text{ на фазу} \right], \quad (2.60)$$

де δ - відносна щільність повітря;

f - частота струму, Гц;

r та D - радіус проводів та відстань між ними, відповідно, см;

U_ϕ - середня фазна напруга на ділянці коронування лінії електропередачі, кВ;

U_0 - мінімальна напруга, при якій на лінії виникає корона (див. (2.55)), кВ.

Виразом (2.60) можна користуватися при симетричному розміщенні проводів у лінії. Для трифазних ліній з несиметричним розміщенням проводів ця формула непридатна, т.я. густина зарядів, а, відповідно, і напруженість електричного поля на різних проводах неоднакові. Для підрахунку витрат енергії на корону у випадку несиметричної лінії доцільніше користуватись видозміненим виразом Фр. Піка, у якому напруги U_ϕ та U_0 замінені відповідними значеннями максимальної напруженості електричного поля біля поверхні проводу:

$$P_k = \frac{241}{\delta} \cdot (f + 25) \cdot \sqrt{\frac{r}{D}} \cdot r^2 \cdot \left(\ln \frac{D}{r} \right)^2 \cdot (E_{\text{макс}} - 30,3^* \cdot m \cdot \delta)^2 \cdot 10^{-5} \left[\text{кВт} \cdot \text{км}^{-1} \text{ на фазу} \right] \quad (2.61)$$

У виразі (2.61) початкове значення напруженості електричного поля E_0 к виникнення коронного розряду враховане коефіцієнтом $30,3^*$. Тут знак * вказує на те, що при розрахунку втрат на корону доцільніше використовувати значення $E_{0 \text{ макс}}$ для певної марки проводу, скориставшись даними табл. 2.4 (див. далі).

Напруженість електричного поля $E_{\text{макс}}$ на поверхні проводів лінії в залежності від радіуса та розміщення визначається з рівнянь Максвелла, які пов'язують заряди на проводах та їх потенціали (див. розділ I), а замість дійсних відстаней між проводами необхідно взяти у (2.61) середньгеометричну відстань $D_{\text{ср}} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{13}}$.

Значно більше, ніж відстань впливає на результати розрахунків коефіцієнт m , який враховує шорсткість проводів через стан їх поверхні та атмосферні умови ($m = m_1 \cdot m_2$).

Для лінії електропередачі з симетричним розміщенням проводів, виходячи з результатів експериментальних досліджень, професор А.М. Залесський

запропонував таку емпіричну формулу визначення втрат потужності на місцеву корону:

$$P_k = \frac{2,22 \left(f + \frac{6000}{D} \right) \cdot (U_\phi - U_0)^2 \cdot 10^{-4}}{\ln \frac{D}{L_{cp}}} \left[\text{кВт} \cdot \text{км}^{-1} \text{ на фазу} \right], \quad (2.62)$$

де L_{cp} - середня довжина переміщення іонів за півперіод напруги, см, яка визначається з виразу:

$$L_{cp} = 19 \cdot \sqrt{\frac{r \cdot E_{0k}}{f}} \text{ [см]}, \quad (2.63)$$

де E_{0k} - початкова напруженість електричного поля частотою 50 Гц видимої корони, $\text{кВ} \cdot \text{см}^{-1}$, яка визначається з виразу (2.54).

2.10.4 Розрахунок втрат потужності на загальну корону

Розрахунок втрат потужності на корону для ліній електропередачі надвисоких лінійних напруг (330, 500, 750, 1150 кВ) відрізняється від наведеного вище тим, що в даному випадку високі напруженості електричного поля викликають загальну корону, яка покриває всю протяжність поверхні проводу у несприятливих погодних умовах.

Початкову максимальну напруженість $E_{0\text{макс}}$ електричного поля у випадку появи загальної корони визначають згідно виразу (2.54).

В табл. 2.4 наведені значення розрахункового радіуса та початкової напруженості при відносній густині повітря $\delta = 1$ для основних марок сталевалюмінієвих проводів.

Таблиця 2.4 - Розрахункові радіуси r_0 та початкові напруженості електричного поля $E_{0\text{макс}}$ сталевалюмінієвих проводів

Марка проводу	АСО -240	АСО -300	АСО -400	АСО -500	АСО -600	АСО -700	АСУ -240	АСУ -300	АСУ -400	АС-240	АС-300	АС-400
$r_0, \text{см}$	1,08	1,175	1,36	1,51	1,655	1,855	1,12	1,26	1,45	1,08	1,21	1,40
$E_{0\text{макс}}, \text{кВ} \cdot \text{см}^{-1}$	31,9	31,6	31,2	30,9	30,6	30,2	30,2	31,4	31,0	31,9	31,6	31,1

Так як на втрати енергії при короні на лінії електропередачі істотний вплив мають атмосферні явища і погодні умови виокремлюються 4 групи погоди: ясна погода (без опадів); сухий сніг; дощ і мокрий сніг; паморозь, іній, ожеледь.

На рис. 2.14 подані узагальнені криві питомих втрат потужності на корону для вищенаведених видів погоди. Характеристики втрат на корону

представляють у виді залежностей $\frac{P_k}{n^2 \cdot r_0^2} = f \left(\frac{E_i}{E_{0\text{макс}}} \right)$,

де P_k - втрати потужності на корону на проводі, $\text{кВт} \cdot \text{км}^{-1}$,

n – кількість проводів у фазі;

r_0 – радіус проводу, $см$;

i – кількість фаз у лінії;

E_i – робоча напруженість електричного поля на i -тому проводі, $кВ \cdot см^{-1}$;

$E_{0.макс}$ – початкова напруженість електричного поля при $\delta = 1$, $кВ \cdot см^{-1}$.

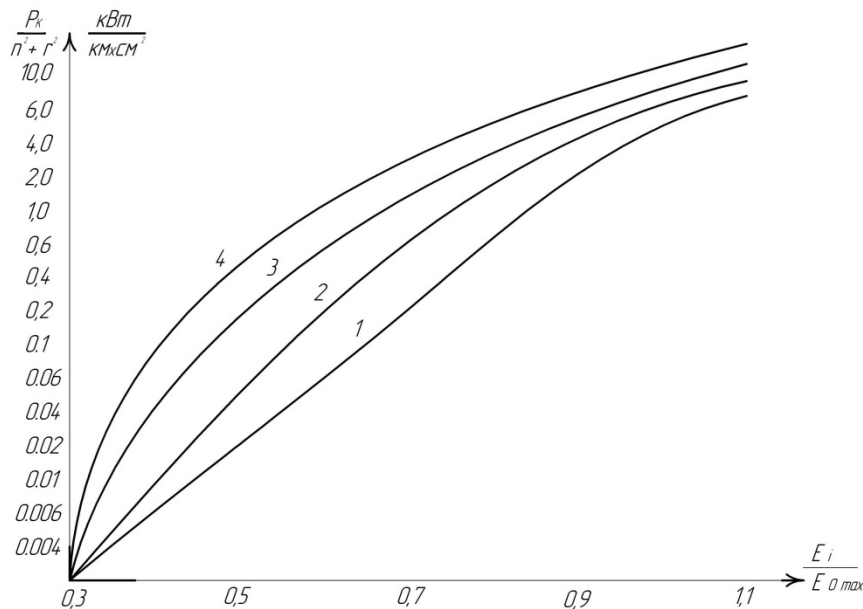


Рис. 2.14 Узагальнені характеристики втрат потужності на загальну корону на лініях електропередачі для погодних умов:

1 - ясна погода; 2 - сніг; 3 - дощ; 4 - паморозь

При проектуванні ліній електропередачі у районах з помірним кліматом на рівнинній місцевості (80% території України) рекомендовано приймати тривалість різних видів погоди згідно даних табл. 2.5.

Таблиця 2.5 - Тривалість різних видів погоди у районах з помірним кліматом

Види погоди	Тривалість T за рік, год.
Ясна погода ($я$)	7120
Дощ та мокрий сніг ($д$)	500
Паморозь зерниста та ожеледь ($n_з$)	110
Паморозь кристалічна ($n_к$)	230
Сніг ($с$)	800
Разом	8760

У трифазній лінії електропередачі середньорічні втрати потужності на загальну корону визначаються як сумарні для всіх видів погоди згідно виразу:

$$\begin{aligned}
P_{\kappa} = \frac{n^2 \cdot r_0^2}{8760} \cdot & \left\{ \left[f_{\text{я}} \left(\frac{E_1}{E_0 \cdot \delta^3} \right) + f_{\text{я}} \left(\frac{E_2}{E_0 \cdot \delta^3} \right) + f_{\text{я}} \left(\frac{E_3}{E_0 \cdot \delta^3} \right) \right] \cdot T_{\text{я}} + \right. \\
& + \left[f_{\text{д}} \left(\frac{E_1}{E_0} \right) + f_{\text{д}} \left(\frac{E_2}{E_0} \right) + f_{\text{д}} \left(\frac{E_3}{E_0} \right) \right] \cdot T_{\text{д}} + \\
& + \left[f_{\text{н}} \left(\frac{E_1}{E_0} \right) + f_{\text{н}} \left(\frac{E_2}{E_0} \right) + f_{\text{н}} \left(\frac{E_3}{E_0} \right) \right] \cdot T_{\text{н}} + \\
& \left. + \left[f_{\text{с}} \left(\frac{E_1}{E_0} \right) + f_{\text{с}} \left(\frac{E_2}{E_0} \right) + f_{\text{с}} \left(\frac{E_3}{E_0} \right) \right] \cdot T_{\text{с}} \right\} \left[\text{кВт} \cdot \text{км}^{-1} \text{ на лінію} \right] \quad (2.64)
\end{aligned}$$

де E_1, E_2, E_3 - середні напруженості електричного поля на проводах кожної фази при середній робочій нарузі на лінії електропередачі, кВ ;

$T_{\text{я}}, T_{\text{д}}, T_{\text{н}}, T_{\text{с}}$ - середньорічна тривалість видів погоди, год. ;

$f_{\text{я}}, f_{\text{д}}, f_{\text{н}}, f_{\text{с}}$ - значення функцій залежностей втрат на корону, $\text{кВт} \cdot (\text{км} \cdot \text{см})^{-1}$ від відношення E_i / E_0 ($i = 1, 2, 3$);

δ - відносна густина повітря при середньорічних значеннях тиску p та температури $t^{\circ}\text{C}$ ($\delta = 1$ для ліній, прокладених на висоті до 500 метрів над рівнем моря).

Тривалість *паморозі* слід врахувати окремо з розподілом її на *кристалічну* та *зернисту*, внаслідок того, що при визначенні тривалості *кристалічної паморозі*, необхідно враховувати зменшення її впливу внаслідок нагріву проводів робочим струмом з щільністю j [$\text{А} \cdot \text{мм}^{-2}$] для різних типів проводів, як це показано на рис. 2.15. Для цього вводиться поправковий коефіцієнт k_0 , перемноженням на який тривалість кристалічної паморозі зменшується і додається до тривалості *ясної погоди* ($k_0 \cdot n_{\text{кр}} \rightarrow +n_{\text{я}}$).

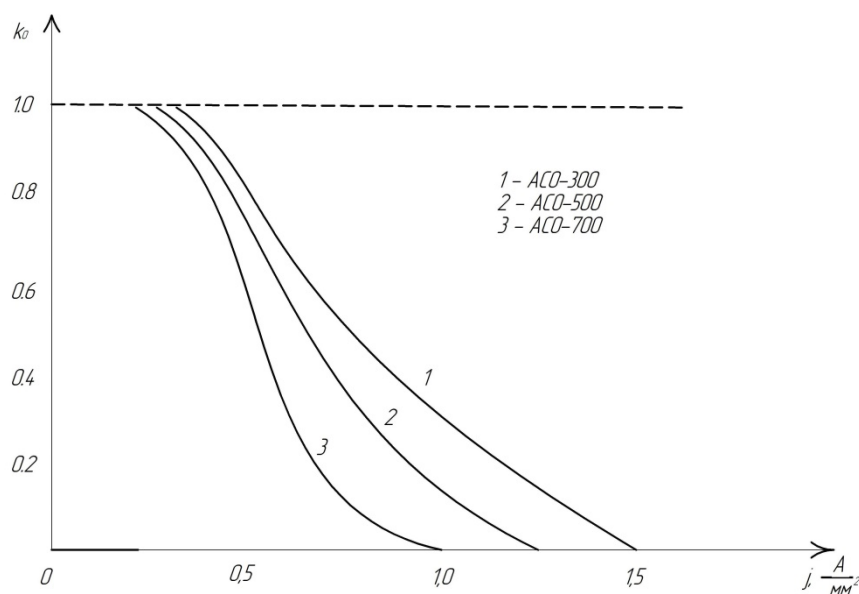


Рис. 2.15 Залежність поправкового коефіцієнта k_0 від щільності струму j для різних проводів

Для уточнення втрат потужності на корону у лінії на окремих її ділянках здійснюються заміри втрат. Такі ж заміри проводяться на дослідно-експериментальних ділянках; результати порівнюються.

В техніко-економічних розрахунках рекомендовано враховувати втрати на корону ЛЕП, якщо максимальна напруженість електричного поля на поверхні проводів $E_{\max} > 0,5 \cdot E_0$. Економічно прийнятні (допустимі) втрати потужності на корону мають місце при

$$\frac{E_{\max}}{E_0} \leq 0,9 \quad (2.65)$$

і це співвідношення є визначальним при виборі проводів ліній електропередачі з умови обмеження втрат потужності на коронний розряд.

Підсумок

Коронний розряд або корона - це самостійний розряд, який виникає в різко неоднорідних полях, де іонізаційні процеси можуть відбуватися лише у вузькій області поблизу електродів.

Для системи паралельних провідників малих радіусів проводів до теперішнього часу актуальною залишається формула Піка

Внаслідок безперервного видалення об'ємного заряду від проводу уніполярний коронний розряд може підтримуватися як завгодно довго.

Рух іонів під дією сил електричного поля утворює струм у проміжку між коронуючим проводом і землею. Для цього необхідні витрати енергії, які і визначають, в основному, втрати енергії на корону, оскільки втрати електричної енергії на іонізацію повітря набагато менші.

При коронуванні двох різнойменно заряджених проводів струм корони, а відповідно, і втрати енергії на корону збільшуються. Такий режим коронування називається біполярною короною.

Залежність напруги запалювання коронного розряду від амплітуди напруги на проводі називається характеристикою запалювання корони. При змінній напрузі коронування проводів більш інтенсивне, ніж при постійній напрузі.

Заряд кожного проводу розщепленої фази складає тільки частину загального заряду фази.

Місцева корона - це коронний розряд, який виникає у місцях з підвищеною напруженістю електричного поля.

Оцінка втрат енергії на місцеву корону здійснюється на основі емпіричного виразу Франка Піка, який без змін використовується донині.

Для лінії електропередачі з симетричним розміщенням проводів для визначення втрат потужності на місцеву корону використовується емпірична формула проф. А.М. Залеського.

Загальна корона покриває всю протяжність поверхні проводу у несприятливих погодних умовах і зумовлює відповідні втрати. Так як на втрати

енергії при короні на лінії електропередачі істотний вплив мають атмосферні явища і погодні умови виокремлюються 4 групи погоди: ясна погода (без опадів); сухий сніг; дощ і мокрий сніг; паморозь, іній, ожеледь.

Досліджені розрядні напруги й коронного розряду на стандартних проміжках типу: «два паралельних проводи», «дві кулі», «куля–площина» й «стрижень–площина».

Пробивна напруга розрядного проміжку «стрижень–площина» при негативній полярності стрижня суттєво вища, ніж при позитивній полярності.

У ході розвитку стримерного розряду він розігрівається і перетворюється у канал підвищеної провідності - лідерний розряд.

Велика напруженість електричного поля на границі плазмового високоіонізованого каналу та каналу лідера викликає розповсюдження зони інтенсивної іонізації по напрямку до стержня. Цей процес, який супроводжується яскравим спалахом каналу та проходженням вздовж нього імпульсу великого струму, називається головним розрядом.

Запитання

Що таке коронний розряд і яка його особливість?

Закономірності між якими величинами встановлює формула Піка?

Що таке уніполярний коронний розряд і яка тривалість його підтримання?

Яка фізична суть втрат енергії на корону?

Чому втрати енергії на біполярну корону вищі, ніж на уніполярну?

Які закономірності процесу коронування на проводах ліній електропередачі при змінній напрузі?

В чому полягає ефект розщепленої фази лінії електропередачі?

В чому різниця між місцевою і загальною короною?

В яких випадках для розрахунку втрат потужності на коронний розряд використовуються емпіричні вирази Фр. Піка та А.М. Залесського?

Які групи погодних умов виділяють при розрахунку втрат потужності на корону та для яких втрат таку методику використовують?

Чому пробивна напруга розрядного проміжку «стрижень–площина» при негативній полярності стрижня суттєво вища, ніж при позитивній полярності?

Які стадії розвитку розрядного процесу у проміжку «стрижень–площина»?

ТЕМА 8. РОЗРЯДИ В ЗОВНІШНІЙ ІЗОЛЯЦІЇ ПРИ ГРОЗОВИХ ТА КОМУТАЦІЙНИХ ІМПУЛЬСАХ

Лекція 13

[2, с. 86–110; 3, с. 88–96; 6, с. 62–96; 7, с. 65–73; 13; 16]

2.11 Розряди в зовнішній ізоляції при грозових і комутаційних імпульсах

2.11.1 Статистичні закономірності розрядних напруг

На розрядні напруги *зовнішньої ізоляції* - повітряні проміжки та ізолятори - при постійних метеорологічних умовах справляють вплив випадкові фактори, пов'язані з виникненням та розвитком розрядів. До них належать, наприклад, різні траєкторії розвитку розряду при одних і тих же умовах випробувань. Цей та інші практичні спостереження підтверджують факт *випадковості* розрядних напруг, які підпорядковуються деяким **статистичним** закономірностям.

Результати експериментів вказують на те, що *розкид значень* розрядних напруг зовнішньої ізоляції відповідає **нормальному закону розподілу** (розподілу Гауса). *Інтегральна функція розподілу* ймовірності виникнення розряду при напрузі U описується виразом (див. рис. 2.20):

$$F(U) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^U \exp\left(-\frac{(U - \bar{U})^2}{2 \cdot \sigma^2}\right) dU, \quad (2.71)$$

де $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{U} - U_i)^2}{N - 1}}$ - середньоквадратичне відхилення розрядних напруг U_i від

50%-го значення, яке є мірилом крутості інтегральної кривої розподілу ймовірностей;

\bar{U} - значення розрядної напруги, яке відповідає 50%-й ймовірності (математичне сподівання; ще позначається як U_{50});

N - кількість дослідів.

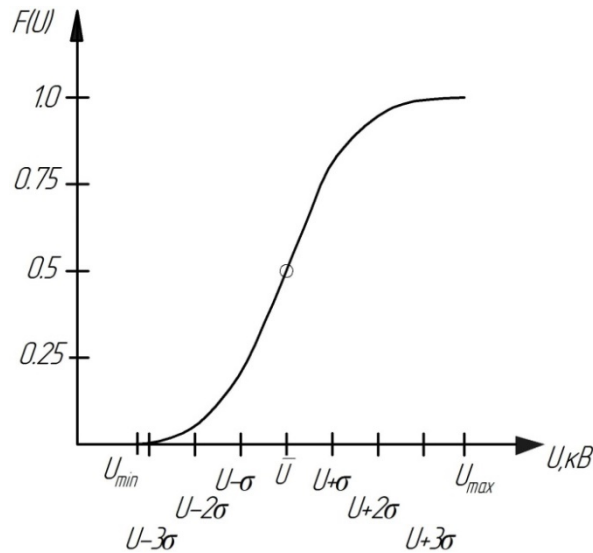


Рис. 2.20 Інтегральна функція нормального розподілу ймовірності розрядних напруг

Ймовірність $P(U)$ того, що відхилення розрядних напруг в обидва боки від середньої напруги \bar{U} не буде перевищувати $k \cdot \sigma$, де $k = 1, 2, \dots$, оцінюється значеннями згідно таблиці 2.6:

Таблиця 2.6 - Ймовірності відхилення розрядних напруг

$k \cdot \sigma$	$1 \cdot \sigma$	$2 \cdot \sigma$	$3 \cdot \sigma$	$4 \cdot \sigma$
$P(U_i - \bar{U} \leq k \cdot \sigma)$	0,3174	0,0455	0,0027	0,000064

Звідси випливає, що, наприклад, ймовірність розряду при напрузі $U \leq \bar{U} - 2 \cdot \sigma$ рівна 0,023, а при напрузі $U \leq \bar{U} - 3 \cdot \sigma$ вона ще менша і становить 0,00135. Для оцінювання найменшої розрядної напруги у ряді випадків використовується вираз:

$$U_{\min} = \bar{U} - 3 \cdot \sigma, \quad (2.72)$$

оскільки ймовірність розряду при нижчій напрузі є мізерною.

Поряд із заміром 50%–ї розрядної напруги U_{50} важливим завданням випробувань ізоляції є визначення можливих розрядів розрядних напруг та середньоквадратичного відхилення σ . Відносне значення середньоквадратичного відхилення розрядних напруг:

$$c = \frac{\sigma}{U} \cdot 100\% \quad (2.73)$$

називається *стандартом розподілу* (коефіцієнтом варіації).

2.11.2 Розряди при імпульсних напругах

Імпульсами в ТВН називають напруги або струми, діючі *короткочасно* (протягом декількох десятків мікросекунд) на ізоляційних проміжках. Найбільш небезпечні хвилі імпульсних напруг виникають в електричних установках при *атмосферних перенапругах*, викликаних розрядами **блискавок**. Ці перенапруги

можуть супроводжуватися пошкодженнями ізоляції та відключенням установок. Імпульсні напруги (струми) в лабораторних умовах одержують від генераторів високовольтних імпульсних напруг (струмів).

Характерний вигляд високовольтного імпульсу подано на рис 2.21. Ділянка кривої, де напруга зростає від нуля до максимуму (амплітуди імпульсу) називається *фронтом імпульсу* (хвилі); спадаюча ділянка - *хвостом імпульсу*.

Так як розрядні імпульсні напруги залежать від форми хвилі імпульсу, для одержання порівнянних результатів при випробуванні зовнішньої ізоляції виявилось необхідним стандартизувати форму кривої імпульсу. Виходячи з технічних міркувань, за *тривалість фронту імпульсу* τ_ϕ приймають час не від нуля до максимуму, а *умовну* величину, яка визначається побудовою форми імпульсу. Така побудова називається *випрямленням* фронту хвилі. Згідно ГОСТ 1516.1-76 (введ. 01.1978; перевид. 07.1999; статус - діючий, міждержавний) випрямлення фронту імпульсу здійснюється через точки $0,3 \cdot U_{\max}$ та $0,9 \cdot U_{\max}$. Пересічення прямої, проведеної через вказані точки, з *нульовою* лінією напруги (вісь часу) та з горизонтальною прямою на висоті *амплітуди* імпульсу, визначає тривалість фронту τ_ϕ . Відношення $\frac{U_{\max}}{\tau_\phi}$ визначає

максимальну *швидкість зміни напруги* по часу на *фронті хвилі* - величину, яка часто використовується при розрахунках грозозахисту.

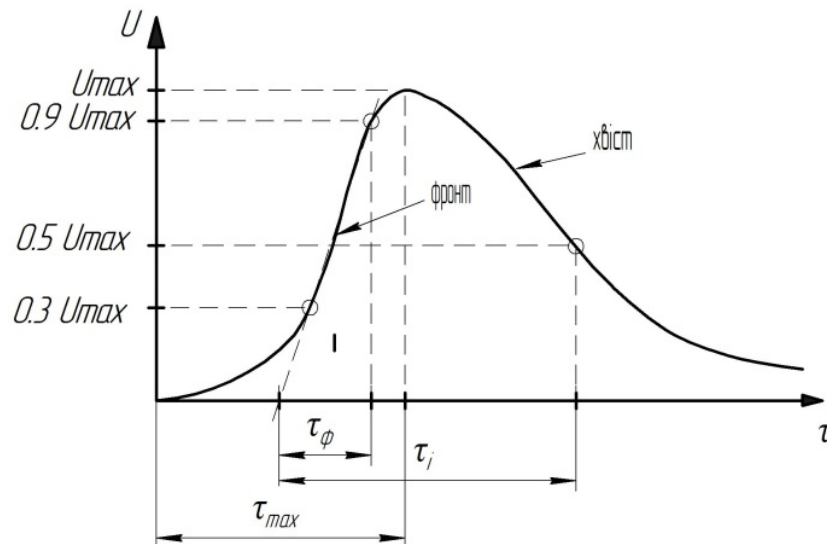


Рис. 2.21 Форма імпульсу напруги

Іншою характеристикою хвилі є *тривалість імпульсу* τ_i - час, відрахований від початкової точки випрямленого фронту до моменту, коли напруга імпульсу знизиться до 50%-го амплітудного значення.

Хвилі напруг у повітряних ЛЕП розповсюджуються з швидкістю світла, тобто $V = 3 \cdot 10^8 \frac{M}{c} = 300 \frac{M}{MKS}$. Так як розмірності: $\dim \tau_\phi = MKS$ та $\dim \tau_i = MKS$, довжину фронту імпульсу l_ϕ та довжину хвилі $l_{xв}$ можна знайти з таких рівнянь:

$l_{\phi} = 300 \cdot \tau_{\phi} [м]$ та $l_{xв} = 300 \cdot \tau_i [м]$, а їх розмірності будуть у метрах.

2.11.3 Випробування зовнішньої ізоляції стандартними імпульсами

Випробування *комутаційними імпульсами* напруги проводиться при додатній і від'ємній полярності імпульсів. Форма *aperiodичного* комутаційного імпульсу: $\tau_{\phi} = (250 \pm 50) мкс$ і $\tau_i = (2500 \pm 500) мкс$, або скорочено: $250/2500 мкс$.

Випробування лінійної ізоляції проводиться також затухаючими *коливальними* комутаційними імпульсами $4000/7500 мкс$. Допуск по часу зростання напруги до першого максимуму $\pm 1000 мкс$, по тривалості імпульсу - $\pm 2500 мкс$. Випробування ізоляторів проводяться в *сухому* стані та під *дощем* (*сухо-* та *вологорозрядні* характеристики).

Випробування т.з. «грозовими» імпульсами дозволяють визначити здатність ізоляції протистояти грозовим перенапругам. Випробування проводяться при додатній і від'ємній полярності імпульсів. Форма повного «грозового» імпульсу: тривалість фронту $\tau_{\phi} = (1,20 \pm 0,36) мкс$, тривалість імпульсу $\tau_i = (50 \pm 10) мкс$, або скорочено $1,2/50 мкс$. Випробування проводяться тільки в *сухих* умовах, оскільки дощ і забруднення при такій короткочасній дії імпульсу практично не впливають на значення розрядних напруг.

На відміну від випробувань *комутаційними* імпульсами, коли пробій ізоляції виникає у *процесі зростання* прикладеної напруги, при випробуваннях «грозовими» імпульсами на об'єкт подається деяке їх число, а *ймовірність розряду* $P(U)$ при даній напрузі визначається як відношення числа імпульсів, при дії яких відбувся розряд на об'єкті, до загального числа поданих імпульсів.

2.11.4 Час розряду та вольт–секундні характеристики повітряних проміжків

При дії *короткочасних* імпульсів на повітряний проміжок значення розрядної напруги залежить від тривалості дії імпульсу. Якщо до проміжку прикладена напруга, достатня для його пробою, то для *розвитку* і *завершення* розряду у проміжку необхідний певний час t_p , який називається *часом розряду* (передрозрядним часом).

Розвиток *самостійного розряду* починається з появи у проміжку *ефективного початкового* електрона, що є випадковою подією. Час очікування ефективного електрона має певний розкид і тому називається *статистичним часом запізнення розряду* t_c . Це перша складова часу розряду. Інша складова, яка має також статистичний характер, є *часом формування розряду* t_{ϕ} , тобто часом від моменту появи початкового електрона до завершення пробою проміжку. При достатньо великій тривалості фронту імпульсу має значення також *початковий час* t_0 - час підйому напруги до *початкового* значення U_0 . Таким чином, в загальному випадку час розряду визначається як

$$t_p = t_0 + t_c + t_\phi. \quad (2.74)$$

Якщо тривалість прикладеного до проміжку імпульсу менша часу розряду $\tau_i \leq t_p$, то пробій не відбудеться, хоча значення напруги є достатнім для цього при тривалій її дії.

Складові часу розряду t_c та t_ϕ залежать від значення величини напруги на повітряному проміжку. При збільшенні напруги підвищується ймовірність того, що електрони, які з'являються у проміжку, стануть ефективними і час t_c зменшується. Скорочується також і час t_ϕ , оскільки при більшій напрузі зростає інтенсивність розрядних процесів у проміжку. Тому, чим вища розрядна напруга, тим менший час розряду.

Залежність максимальної напруги розряду від тривалості розряду (передрозрядного часу) називається **вольт-секундною характеристикою** ізоляції. Оскільки початок і швидкість розвитку іонізаційних процесів залежать від значення напруги, вольт-секундні характеристики залежать від *форми імпульсу*.

З метою уніфікації випробувань та можливості співставлення ізоляційних конструкцій їх випробування проводять при *стандартному «грозовому» імпульсі*: 1,2/50 мкс. Якщо ізоляція пробивається, хвиля імпульсу *зрізується*. На рис. 2.22 показані зрізи хвиль імпульсів при дії їх на ізоляцію. Хвилі 1 та 2 мають настільки великі амплітуди, що зрізи (розряди) відбуваються ще до досягнення ними максимальних величин на фронті. В цьому випадку максимальна напруга на ізоляції рівна *напрузі зрізу*. При дії на ізоляцію хвиль імпульсів 3, 4 та 5 розряди відбуваються на *хвості* імпульсів. Максимальні величини напруг на ізоляції рівні *амплітудам імпульсів*, т. я. при максимальній напрузі відбувалось формування розряду. Час розряду t_p у всіх випадках визначається від початку імпульсу до моменту зрізу.

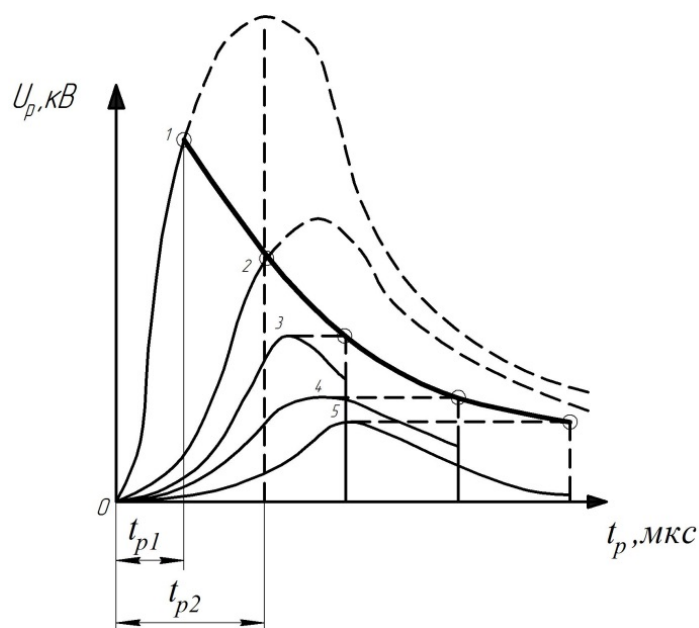


Рис. 2.22 Побудова вольт-секундної характеристики ізоляції

Вигляд вольт-секундної характеристики залежить від ступеня *неоднорідності* електричного поля у повітряному проміжку.

Для проміжків з однорідним або слабо неоднорідним електричним полем вольт-секундна характеристика (див. рис. 2.23, *крива 1*) тільки при тривалості розряду порядку 1 мкс та меншої має різке збільшення розрядної напруги. Пов'язано це з тим, що розряд в таких проміжках формується за дуже малий час при напрузі, рівній початковому значенню.

Вольт-секундні характеристики проміжків з різко неоднорідним електричним полем (див. рис. 2.23, *крива 2*) мають достатньо велику кривизну, оскільки в них час формування розряду сильно залежить від значення прикладеної напруги. Для таких проміжків при «грозових» імпульсах характерні більші розрядні напруги U_p , ніж при змінній напрузі частотою 50 Гц U_{\sim} .

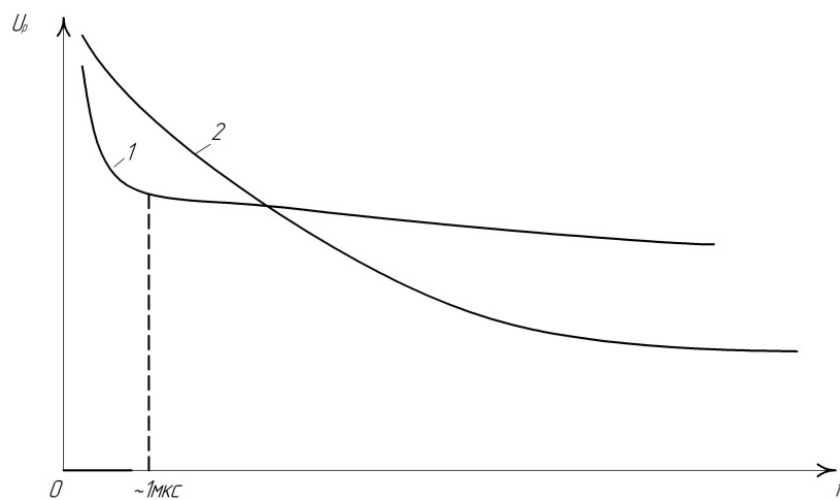


Рис. 2.23 Вольт-секундні характеристики для розрядних проміжків з однорідним (1) та різко неоднорідним (2) електричними полями («грозові» імпульси)

Відношення

$$K_{imn} = \frac{U_p}{U_{\sim}} \quad (2.75)$$

називається *коефіцієнтом імпульсу* K_{imn} і відноситься до певного часу розряду.

Проміжки з однорідним та слабо неоднорідним електричними полями мають $K_{imn} = 1$ практично у всьому діапазоні тривалості розряду.

При *комутаційних* імпульсах розряд відбувається на фронті імпульсу. Вольт-секундні характеристики, одержані при різних крутостях фронту імпульсу, мають *мінімум*. При цьому розрядні напруги можуть бути нижчими від значень U_{\sim} ($K_{imn} \leq 1$), що повинно враховуватись при визначенні ізоляційних відстаней в електричних установках.

Так же, як і при тривалості дії напруги, при дії імпульсних хвиль необхідно вводити поправки на щільність та вологість повітря. Вплив цих факторів при

імпульсах такий же, як і при напругах промислової частоти.

Якщо час розряду становить $t_p \geq 8 \text{ мкс}$, поправка на щільність повітря вводиться коефіцієнтом $\delta = 0,386 \cdot \frac{P}{273 + t^0 \text{C}}$. Якщо ж $t_p \leq 8 \text{ мкс}$, то додатково враховується коефіцієнт k_0 , величина якого подана на рис. 2.24, таким чином:

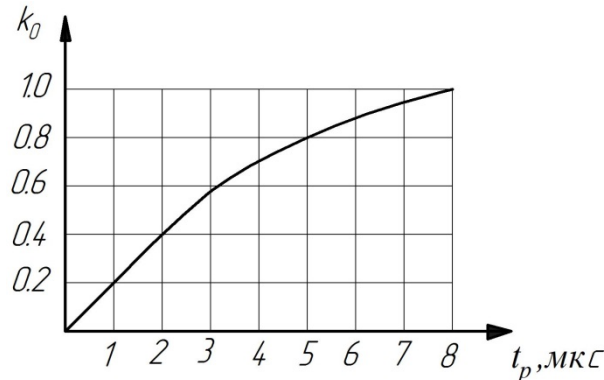


Рис. 2.24 Поправковий коефіцієнт k_0 на щільність та вологість повітря при $t_p \leq 8 \text{ мкс}$

Якщо час розряду становить $t_p \geq 8 \text{ мкс}$, поправка на щільність повітря вводиться коефіцієнтом $\delta = 0,386 \cdot \frac{P}{273 + t^0 \text{C}}$. Якщо ж $t_p \leq 8 \text{ мкс}$, то додатково враховується коефіцієнт k_0 , величина якого подана на рис. 2.24, таким чином:

- визначається відносна щільність повітря δ при температурі та тиску випробувань;

- з рис. 2.24 знаходиться коефіцієнт k_0 , а з виразу $k_0' = 1 - k_0 \cdot (1 - \delta)$ - поправковий коефіцієнт ще на щільність повітря;

- виміряна розрядна напруга $U_{i \text{ макс}}$ перераховується на нормальні

умови випробувань: $U_{i \text{ макс}}' = \frac{U_{i \text{ макс}}}{k_0'}$.

Поправка на вологість для імпульсних напруг та напруги промислової частоти подана на рис. 2.25. Тут за нормальну вологість

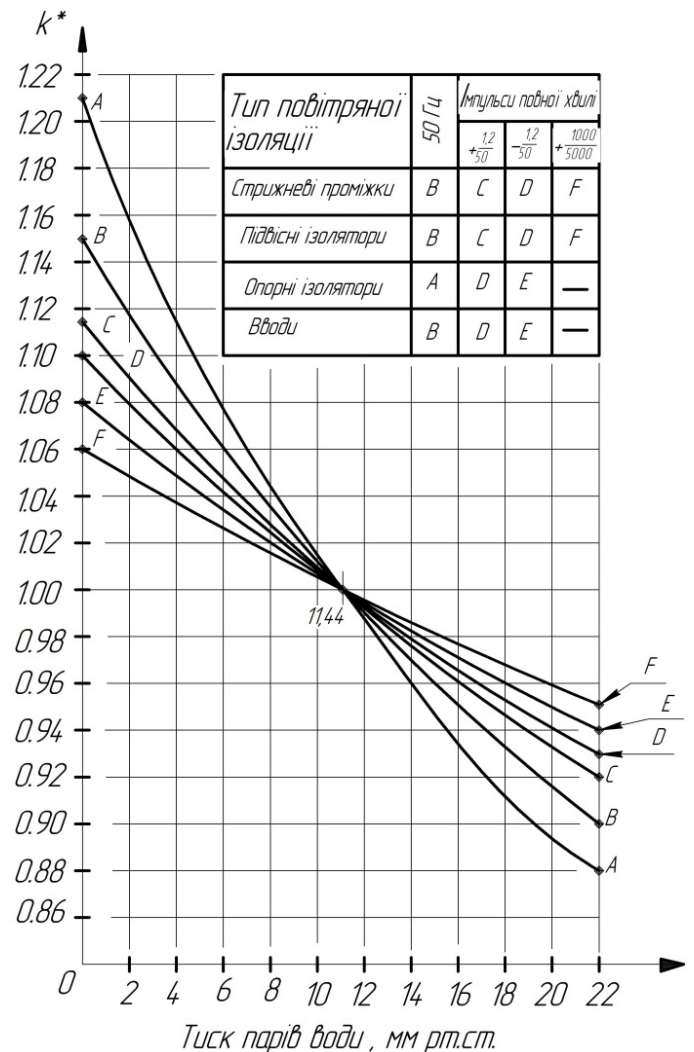


Рис. 2.25 - Поправковий коефіцієнт k^*

прийнята абсолютна вологість $11,0 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$, рівна $11,44 \text{ мм рт.ст.}$ тиску водяних парів.

на вологість повітря для розрядних напруг

Для тривалості розряду $t_p \geq 8 \text{ мкс}$ приймається поправка k^* згідно рис. 2.25. Якщо ж $t_p \leq 8 \text{ мкс}$ - приймається коефіцієнт k_0 згідно рис. 2.24.

При розрядних напругах нижче $U_{p \text{ макс}} \leq 141 \text{ кВ}$ поправки зменшуються пропорційно відношенню $\frac{U_{p \text{ макс}}}{141}$.

2.12 Розряди в повітрі вздовж поверхні ізоляторів

2.12.1 Вплив конструктивних особливостей ізоляторів на напругу перекриття

Розглянемо вплив твердого діелектрика на виникнення та розвиток розряду в повітрі **вздовж поверхні** ізолятора.

Моделі ізоляторів:

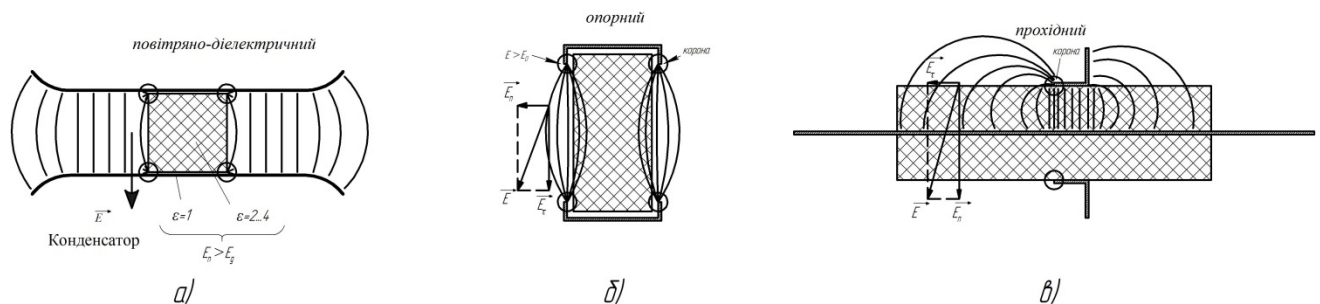


Рис. 2.26 Характерні конструкції повітряних проміжків з твердим діелектриком:

- комбінований повітряно-діелектричний конденсатор;
- опорний ізолятор;
- прохідний ізолятор

В ізоляційній конструкції на рис. 2.26, а) (комбінований повітряно-діелектричний конденсатор) *електрична міцність* проміжку з діелектриком *менша*, ніж суто повітряного проміжку. Це пов'язано з *адсорбцією* вологи з оточуючого вологого повітря на поверхню діелектрика, а також з мікропрошарками між твердим діелектриком та електродами. Поверхня всіх тіл у вологому повітрі вкрита мікроплівкою води. Іони, які утворюються у цій плівці під дією електричного поля, зміщуються до електродів. Як результат, електричне поле поблизу електродів *підсилюється*, а посередині проміжку - *слабшає*. Підсилення електричного поля біля електродів зумовлює зменшення електричної міцності проміжку. Це зниження тим більше, чим більш гігроскопічний діелектрик. Наприклад, *скло* більш гігроскопічне, ніж *глазурований фарфор*, а тому має меншу напругу перекриття.

Зменшення напруги перекриття ізолятора при наявності мікропрошарку між діелектриком та електродом або мікротріщин на поверхні діелектрика пов'язане із збільшенням в них напруженості електричного поля внаслідок відмінностей *діелектричних проникностей* повітря і діелектрика (\sim в 2 - 4 рази). Це викликає виникнення іонізаційних процесів в мікропрошарках, продукти яких (іони та електрони) створюють місцеве підсилення поля в основних ізоляційних проміжках, що зменшує напругу перекриття.

В ізоляційній конструкції на рис. 2.26, б) (опорний ізолятор) основну роль відіграє *неоднорідність* електричного поля, що викликає *коронний розряд*. Озон та окисли азоту, які при цьому утворюються згубно діють на твердий діелектрик, особливо на полімерний діелектрик. Якщо коронний розряд має *стримерну* форму, то температура в його стримерному каналі досить висока і дотик стримера до поверхні діелектрика зумовлює термічну деструкцію полімера з утворенням *обвугленого сліду (треку)*. Довжина цього треку з часом зростає, що викликає *перекриття* ізолятора з незворотною втратою ним електричної міцності.

Все це справедливе і для конструкції на рис. 2.26, в) (прохідний ізолятор). До того ж, більша *нормальна* складова електричного поля сприяє зближенню каналу стримера з поверхнею діелектрика, що підвищує ймовірність пошкодження діелектрика. Електрична міцність цієї конструкції менша, ніж конструкції на рис. 2.26, б). *Канали стримерів*, які розвиваються вздовж поверхні діелектрика мають значно більшу *ємність* по відношенню до внутрішнього (струмопровідного) електрода, ніж в конструкції з переважанням тангенціальної складової електричного поля. Тому через стримерні канали проходить більший струм. При деякому значенні напруги струм зростає настільки, що температура стримерних каналів стає достатньою для *термічної іонізації газу* (повітря). Термічно іонізований канал розряду, який розвивається вздовж діелектрика, на поверхні якого *нормальна* складова напруженості електричного поля перевищує *тангенціальну* складову, називається *каналом ковзного розряду*.

Провідність каналу ковзного розряду значно вища від провідності каналу стримера. Тому, спад напруги у каналі ковзного розряду менший, а на не перекритій частині проміжку більший, ніж у каналах стримера. *Збільшення* напруги на не перекритій частині проміжку зумовлює видовження каналу ковзного розряду і повне перекриття проміжку при меншому значенні напруги між електродами.

Довжина каналу ковзного розряду залежить від його провідності, а тому від значення струму в ньому. В свою чергу, струм залежить від *напруги* U між електродами, *зміни напруги* $\frac{du}{dt}$ та *ємності* C каналу стримера відносно протилежного (струмопровідного) електрода. Вплив усіх параметрів відображений в емпіричній формулі Теплера (*August Toepler, нім. фізик, 1836 – 1912*), згідно якої *довжина каналу ковзного розряду*:

$$l_{kp} = \chi \cdot C^2 \cdot U^5 \cdot \sqrt[4]{\frac{du}{dt}}, \quad (2.76)$$

де χ - коефіцієнт пропорційності;

C - питома поверхнева ємність.

З (2.76) при підстановці замість l_{kp} відстані між електродами *вздовж поверхні* діелектрика L , можна визначити значення напруги U_p , необхідної для перекриття ізолятора. Якщо прийняти $C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{D}$, де D – товщина стінки діелектрика (прохідного ізолятора згідно рис. 2.26, в)) і вважати значення $\frac{du}{dt}$ постійним, що у першому наближенні відповідає постійності частоти прикладеної напруги, то з (2.76) одержимо:

$$U_p = \chi \cdot L^{0,2} \cdot \left(\frac{D}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \right)^{0,4}. \quad (2.77)$$

З виразу (2.77) витікає, що ріст довжини ізолятора дає відносно мале підвищення розрядної напруги. *Ефективним* є зменшення питомої поверхневої ємності шляхом *збільшення* діаметра ізолятора *біля фланця*, з якого можна очікувати розвиток розряду. Використовується також нанесення біля фланця півпровідного (не повністю провідного) покриття для вирівнювання розподілу напруг вздовж поверхні ізолятора.

2.13 Розряди в повітрі в умовах зволоженої забрудненої поверхні зовнішньої ізоляції

2.13.1 Ступені забрудненості атмосфери

До *I-го* ступеня забрудненості атмосфери відносяться сільськогосподарські райони, поля, ліси, болота, тундра. До *II-го*, більш високого, ступеня забрудненості відносяться райони з сильною вітровою ерозією ґрунту, сільськогосподарські райони, в яких застосовуються хімічні добрива та гербіциди, промислові міста.

Ступінь забрудненості атмосфери поблизу підприємств встановлюється в залежності від виду й об'єму виробництва і позначається буквами: *A, B, B, Г, Д* в порядку зростання небезпеки. Джерело промислового забруднення впливає на забрудненість атмосфери у межах *певної зони* навколо підприємства. Розміри цієї зони - т.з. *мінімальний захисний інтервал* для різних виробництв складає (300 ... 9000) м. За границями захисного інтервалу забрудненість відноситься до вищевказаних *II-го* або *I-го* ступенів. У межах захисного інтервалу в залежності від відстані до джерела забруднення встановлюються *III-IV-V-й* ступені забрудненості атмосфери.

При відстанях від високовольтної ЛЕП або розподільчого пристрою до промислового джерела забруднення рівних від 1/3 захисного інтервалу до його межі для підприємств груп *B ... Д* забрудненість атмосфери відповідає *III-му* ступеню; те ж - від 1/6 частини до 1/3 інтервалу для підприємств груп *B ... Д* відповідає *IV-му* ступеню; при відстанях менших 1/6 частини захисного інтервалу - відповідає *V-му* й *VI-му* ступеням забрудненості атмосфери.

При накладенні зон забруднення від двох джерел ступінь забруднення атмосфери встановлюється по джерелу, яке створює забруднення, якщо інше джерело дає *III-й* ступінь забруднення. Якщо обидва джерела дають *IV-й* ступінь забруднення, то в зоні їх накладення встановлюється *V-й* ступінь, а в інших випадках - *VI-й* ступінь забруднення.

2.13.2 Вибір будівельної довжини ізоляторів

Визначальним фактором при виборі ізолятора є забезпечення його надійної роботи в умовах туману, роси, дрібного дощу у поєднанні із забрудненням поверхні ізолятора. Значення *вологорозрядної напруги* ізолятора залежить від характеристик забрудненого шару: товщини та питомого опору. При однакових забрудненнях напруга пропорційна *довжині шляху витоку* L_e струму ізолятора, тобто найменшій відстані *вдovж поверхні* ізолюючої частини між двома електродами. Для складних ізоляторів (гірлянд) - це сума довжин шляхів витоку окремих ізоляторів.

Розряд *вдovж поверхні* ізолятора на окремих його ділянках може відриватися від поверхні і розвиватися у повітрі. Крім того, поверхні ізоляторів забруднюються і звожуються нерівномірно. Внаслідок цього, в умовах експлуатації вологорозрядні напруги виявляються пропорційними не L_e , а *ефективним довжинам* шляхів витоку:

$$L_{ef} = \frac{L_e}{K}, [cm], \quad (2.78)$$

де $K \geq 1$ - *коефіцієнт ефективності* ізолятора.

Для *підвісних тарілчастих* ізоляторів коефіцієнт K оцінюють згідно такого емпіричного виразу:

$$K = 1 + 0,5 \cdot \left(\frac{L_e}{D} - 1 \right) \approx 1,0 \dots 1,3, \quad (2.79)$$

де D - діаметр тарілки ізолятора, *см*.

Для зовнішньої ізоляції електрообладнання й опорних ізоляторів відкритих розподільчих пристроїв значення K наведені в таблиці 2.7 (H – будівельна довжина ізоляційної частини конструкції).

Таблиця 2.7 - Коефіцієнт ефективності ізоляційної конструкції

$\frac{L_e}{H}$	1,5 ... 2,0	2,0 ... 2,3	2,3 ... 2,7	2,7 ... 3,2	3,2 ... 3,5
K	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4

Як характеристика надійності ізоляторів при робочій напрузі прийнята *питома ефективна довжина* шляху струму витоку:

$$\lambda_{ef} = \frac{L_{ef}}{U_{роб.макс}}, \left[\frac{cm}{kB} \right], \quad (2.80)$$

де $U_{роб.макс}$ - найбільша міжфазна робоча напруга, *кВ*.

Питома ефективна довжина шляху витоку нормується в залежності від

ступеня забрудненості атмосфери та номінальної напруги установки згідно таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 - Нормована питома ефективна довжина струму витоку ізолятора

Ступінь забрудненості атмосфери	$\lambda_{\text{эф}}$, см / кВ, не менше					
	для повітряних ліній при номінальній напрузі, кВ			для відкритих розподільних пристроїв при номінальній напрузі, кВ		
	35	110–220	330–750	35	110–330	500–750
I	1,7	1,3	1,3	1,7	1,5	1,5
II	1,9	1,6	1,5	1,7	1,5	1,5
III	2,3	1,9	1,8	2,3	1,8	1,8
IV	2,6	2,3	2,3	2,6	2,3	–
V	3,5	3,0	3,0	3,5	3,0	–
VI	4,0	3,5	3,5	4,0	3,5	–

Примітка. Значення $\lambda_{\text{эф}}$ повинні бути збільшені на 5% при висотах (1000 ... 2000) м над рівнем моря, - на 10% при (2000 ... 3000) м, - на 15% при (3000 ... 4000) м.

Для надійної експлуатації при робочій напрузі *геометрична* довжина шляху витоку ізоляторів повинна визначатись як:

$$L_{\text{в}} \geq K \cdot \lambda_{\text{эф}} \cdot U_{\text{роб.макс}} \quad (2.81)$$

Для порівняння: у звичайних ізоляторів довжина шляху витоку складає (28 ... 42) см, а у стійких до забруднення ізоляторів - (40 ... 57) см (див. таблицю 2.9).

Стосовно гірлянд ізоляторів це означає, що число ізоляторів n у гірлянді повинно бути

$$n \geq \frac{K \cdot \lambda_{\text{эф}} \cdot U_{\text{роб.макс}}}{L_{\text{в}_1}}, \quad (2.82)$$

де $L_{\text{в}_1}$ - геометрична довжина шляху струму витоку одного ізолятора.

У зв'язку з можливістю виходу з ладу окремих ізоляторів під час експлуатації, а також деякою трудомісткістю їх заміни кількість ізоляторів збільшується на *один* для ЛЕП 110 кВ і 220 кВ та на *два* для ліній 330 кВ і вище.

Перевірка вибраної кількості ізоляторів відбувається згідно умов роботи гірлянд *під дощем* при дії внутрішніх комутаційних перенапруг. При цьому кількість ізоляторів обчислюється з виразу:

$$n \geq \frac{k_p \cdot U_{\text{роб.макс}}}{E_{\text{мр}} \cdot H}, \quad (2.83)$$

де k_p - розрахункова кратність внутрішніх комутаційних перенапруг;

$E_{\text{мр}}$ - розрахункова вологорозрядна напруженість електричного поля (див. таблицю 2.9), кВ/см.

Таблиця 2.9 Характеристики підвісних лінійних ізоляторів

Тип ізолятора	Будівельна висота H , мм	Діаметр D , мм	Довжина шляху струму витoku L_B , мм	Коефіцієнт ефективності ізолятора K , мм	Діюча напруга корони $U_{кор}$, кВ	Розрахункова середня вологорядна напруженість $E_M P$, кВ / см
ПФ6-В	140	270	324	1,1	35	2,5
ПФ20-А	194	350	420	1,1	32	2,4
ПС6-А	130	255	255	1,0	28	2,6
ПС16-А	170	280	387	1,2	40	2,3
ПС30-А	190	320	425	1,1	45	2,0
ПФГ6-А	198	270	455	1,1	50	3,0
ПСГ16-А	160	320	480	1,2	70	2,8
ПСГ22-А	185	370	570	1,1	75	2,8

Примітка: Райони з підвищеним рівнем забрудненості умовно позначаються цифрами *IV*, *V*, *VI* та вимагають ізоляторів зі спеціальною обробкою поверхні (гідрофобні).

Рекомендовані «Правилами облаштування електроустановок споживачів» кількості ізоляторів у гірляндах для металічних та залізобетонних опор у районах з *I-м* ступенем забрудненості атмосфери приведені у таблиці 2.10.

Таблиця 2.10 - Кількість ізоляторів у гірляндах повітряних ЛЕП та відкритих розподільчих пристроях (у дужках)

Тип ізолятора	Кількість ізоляторів при номінальній напрузі, кВ								
	10	20	35	110	150	220	330	500	750
ПФ6-А	1	3 (4)	3 (4)	7 (8)	9 (10)	13 (14)	19 (20)	(29)	–
ПФ6-Б	1	3 (4)	3 (5)	7 (8)	10 (10)	14 (15)	20 (21)	27 (30)	–
ПФ6-В	1	3 (4)	3 (4)	7 (8)	9 (10)	13 (14)	19 (20)	26 (29)	–
ПФ16-А	–	–	–	6	8	11	17	23	–
ПФ20-А	–	–	–	–	–	10	14	20	–
ПС6-А	1	3 (4)	3 (4)	8 (9)	10 (11)	14 (16)	21 (22)	29 (33)	–
ПС12-А	–	–	3	7	9 (10)	13 (14)	19 (20)	26 (29)	(38)
ПС16-А	–	–	–	6	8	11	16	22	–
ПС16-Б	–	–	–	6	8	12	17	24	–
ПС22-А	–	–	–	–	–	10	15	21	30
ПС30-А	–	–	–	–	–	11	16	22	32

Приклад маркування ізолятора, наприклад, тарілчастого типу *ПС 16-Б*:

П - підвісний;

С - скляний;

16 - гарантована електромеханічна міцність 160 кН;

Б - конструктивне виконання.

2.13.3 Заходи підвищення надійності роботи ізоляторів в умовах експлуатації

На гірляндах ізоляторів ліній 330–750 кВ для вирівнювання розподілу напруг між системою розщеплених проводів та першим ізолятором підвищують екранну арматуру овальної форми з горизонтально–орієнтованою площиною овалу. Така арматура знижує напругу на найближчих до фазних проводів ізоляторах до рівня нижче коронної й *підвищує розрядну напругу* при імпульсних перенапругах.

При дії імпульсної напруги (розряді блискавки) гірлянда ізоляторів поводить по–різному в залежності від тривалості діючої хвилі. При тривалості розряду $t_p \geq 3 \text{ мкс}$ імпульсний розряд вздовж довгих гірлянд відбувається найкоротшим шляхом між електродами - по повітрю. Тому 50%–у розрядну напругу гірлянд ізоляторів можна визначити з будівельної довжини H гірлянди. Розрядний градієнт в цьому випадку приймається для додатної хвилі рівним $\sim 5,5 \text{ кВ/см}$. При дуже малій тривалості імпульсу, тобто на фронті імпульсної хвилі перенапруги, розряд відбувається вздовж поверхні кожного з ізоляторів; тому 50%–а розрядна напруга визначається не будівельною, а сумарною довжиною шляху розряду вздовж поверхні гірлянди ізоляторів.

До експлуатаційних заходів, які підвищують надійність роботи ізоляції в умовах значних забруднень та зволоження, відносяться миття або очищення ізоляторів, застосування гідрофобних покриттів у вигляді твердих плівок або в'язких покриттів типу вазелінів (наприклад, кремнійорганічний вазелін марки $KB-3$). Більш ефективними є в'язкі покриття, т.я. поряд з водовідштовхуванням вони володіють здатністю огортати тверді частинки, які осіли на ізолятор, перешкоджаючи утворенню неперервного шару провідності.

Застосування гідрофобних покриттів вважається виправданим, якщо відсутня потреба їх заміни протягом (1,5 ... 2) років.

Підсумок

На розрядні напруги зовнішньої ізоляції - повітряні проміжки та ізолятори - при постійних метеорологічних умовах справляють вплив випадкові фактори, пов'язані з виникненням та розвитком розрядів.

Результати експериментів вказують на те, що розкид значень розрядних напруг зовнішньої ізоляції відповідає нормальному закону розподілу (розподілу Гауса).

Імпульсами в ТВН називають напруги або струми, діючі короткочасно (протягом декількох десятків мікросекунд) на ізоляційних проміжках.

Випробування т.з. «грозовими» імпульсами дозволяють визначити

здатність ізоляції протистояти грозивим перенапругам. Випробування проводяться тільки в сухих умовах, оскільки дощ і забруднення при такій короткочасній дії імпульсу практично не впливають на значення розрядних напруг.

Якщо до проміжку прикладена напруга, достатня для його пробою, то для розвитку і завершення розряду у проміжку необхідний певний час, який називається часом розряду (передрозрядним часом).

Час розряду складається з трьох компонентів: часу підйому напруги до початкового значення; часу очікування ефективного електрона; часу формування розряду.

Залежність максимальної напруги розряду від тривалості розряду (передрозрядного часу) називається вольт-секундною характеристикою ізоляції.

Вигляд вольт-секундної характеристики залежить від ступеня неоднорідності електричного поля у повітряному проміжку.

В ізоляційній конструкції типу комбінованого повітряно-діелектричного конденсатора електрична міцність проміжку з діелектриком менша, ніж суто повітряного проміжку. Це пов'язано з адсорбцією вологи з оточуючого вологого повітря на поверхню діелектрика, а також з мікропрошарками між твердим діелектриком та електродами, у яких відбувається іонізація повітря.

В ізоляційній конструкції типу опорного ізолятора основну роль відіграє неоднорідність електричного поля, що викликає коронний розряд. Коронний розряд має форму стримера, який обвуглює поверхню ізолятора, викликає перекриття ізолятора з незворотною втратою ним електричної міцності.

В ізоляційній конструкції типу прохідного ізолятора більша нормальна складова електричного поля сприяє зближенню каналу стримера з поверхнею діелектрика, що підвищує ймовірність пошкодження діелектрика.

Ефективним є зменшення питомої поверхневої ємності шляхом збільшення діаметра ізолятора біля фланця, з якого можна очікувати розвиток розряду. Використовується також нанесення біля фланця півпровідного (не повністю провідного) покриття для вирівнювання розподілу напруг вздовж поверхні ізолятора.

Визначальним фактором при виборі ізолятора є забезпечення його надійної роботи в умовах туману, роси, дрібного дощу у поєднанні із забрудненням поверхні ізолятора. Значення вологорозрядної напруги ізолятора залежить від характеристик забрудненого шару: товщини та питомого опору.

Як характеристика надійності ізоляторів при робочій нарузі прийнята питома ефективна довжина шляху струму витoku, яка поряд з номінальною напругою й коефіцієнтом ефективності ізолятора визначає їх кількість у гірлянді з врахуванням кратності перенапруги електроустановки.

До експлуатаційних заходів, які підвищують надійність роботи ізоляції в умовах значних забруднень та зволоження, відносяться миття або очищення ізоляторів, застосування гідрофобних покриттів.

Запитання

Який вплив мають випадкові фактори на виникнення й розвиток розрядів у зовнішній ізоляції електроустановок?

Якому закону підпорядковується розкид значень розрядних напруг зовнішньої ізоляції?

Що таке імпульси в ТВН?

З якою метою проводять випробування зовнішньої ізоляції «грозивими» імпульсами? Які умови випробувань?

Що таке час розряду у проміжку, до якого прикладена імпульсна напруга?

З яких компонентів складається час розряду проміжку, до якого прикладена імпульсна напруга?

Що таке вольт–секундна характеристика ізоляції?

Яку залежність від конфігурації електричного поля має вольт–секундна характеристика ізоляції?

Від яких факторів залежить електрична міцність розрядного проміжку в ізоляційній конструкції типу комбінованого повітряно-діелектричного конденсатора?

Від яких факторів залежить електрична міцність розрядного проміжку в ізоляційній конструкції типу опорного ізолятора?

Від яких факторів залежить електрична міцність розрядного проміжку в ізоляційній конструкції типу прохідного ізолятора?

Яке значення для вибору ізолятора має його вологорозрядна характеристика?

Чому питома ефективна довжина шляху струму витоку прийнята за характеристику надійності ізолятора при робочій напрузі?

Які заходи застосовують для підвищення експлуатаційної надійності зовнішніх ізоляторів електроустановок?

РОЗДІЛ III. ПЕРЕНАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ УСТАНОВКАХ ТА ЗАХИСТ ВІД НИХ

ТЕМА 9. АТМОСФЕРНІ ПЕРЕНАПРУГИ ТА ЗАХИСТ ВІД НИХ

ЛЕКЦІЯ 14

[1, с. 186–230; 2, с. 284–300; 6, с. 128–137; 7, с. 227–270; 9, с. 558–581; 15; 16]

3.1 Атмосферні перенапруги та основні положення захисту

Атмосферні (зовнішні) перенапруги виникають в електричних установках під час грозових розрядів. Їх розділяють на *індуковані* і перенапруги *прямого удару* блискавки.

Індуковані перенапруги на проводах ЛЕП виникають при удачі блискавки в землю поблизу ліній, а також при прямому ударі блискавки безпосередньо в опору лінії або в трос.

Перенапруги прямого удару є наслідком протікання через уражений об'єкт великих струмів блискавки і, відповідно, високих потенціалів на ньому.

Будь-яка ЛЕП характеризується певною *грозоопірністю*, яка залежить від імпульсної міцності лінійної ізоляції, тобто від її вольт-секундної характеристики.

Грозоопірність лінії визначається: захисним рівнем I_3 , тобто граничним значенням амплітуди струму блискавки $I_{б.макс}$, який ще не викликає перекриття ізоляції лінії, та питомим числом відключень n_3 , тобто числом відключень за рік лінії довжиною $l = 100$ км, зумовлених атмосферними перенапругами, при кількості грозових днів у році $n = 20$.

Конструювання ліній електропередач, підстанцій та їх захисних пристроїв здійснюється таким чином, щоб зменшити кількість аварійних відключень ліній та запобігти пошкодженню ізоляції. До *основних заходів*, які забезпечать зниження числа відключень, відносяться:

- захист лінії від прямих ударів блискавки блискавковідводами;
- подовження шляху електричного розряду вздовж ізоляційної конструкції, що понижує можливість перетворення імпульсного перекриття у стійку силову дугу;
- захист окремих ділянок ліній з послабленою ізоляцією трубчатими розрядниками;
- застосування систем автоматичного повторного вмикання (АПВ).

3.2 Електричний грозовий розряд (блискавка)

3.2.1 Блискавка. Загальні відомості.

Блискавка - електричний розряд, джерелом якого є грозова хмара. В

установках високої напруги найбільшому ураженню піддані ЛЕП внаслідок свого розташування над поверхнею землі й значної протяжності. При цьому виникають перенапруги, які у повітряних ЛЕП переважають всі інші види перенапруг.

Перші наукові дослідження блискавки були здійснені Бендж. Франкліном, Мих. Ломоносовим та Георг. Ріхманом всередині XVIII ст. Була доведена електрична природа блискавок. М.В. Ломоносов у своїй праці «Слово о явлениях воздушных от электрической силы происходящих» вперше подав наукову теорію утворення грозових хмар. Згідно з цією теорією, хмари утворюються завдяки переміщенню з великою швидкістю теплого вологого повітря вгору, його охолодження й конденсації парів вологи у краплини. Присутні при цьому висхідні або низхідні потоки повітря викликають тертя частинок вологи і породжують «великую электрическую силу». Блискавка, згідно Ломоносова, - розряд великої кількості електрики з хмари на землю. Сучасні теорії утворення грозових хмар, по суті, повторюють основні положення поглядів Ломоносова.

3.2.2 Утворення електричних зарядів у грозових хмарах.

Земля оточена на висоті біля 80 км *іоносферою* - шаром із значним переважанням іонів позитивного заряду. Сама Земля заряджена негативно. Електричне поле Землі направлене зверху вниз. В ясну безвітряну погоду напруженість електричного поля біля поверхні землі рівна $E_3 = 130 \frac{В}{м}$. Це дозволяє визначити від'ємний заряд всієї Землі Q_3 :

$$Q_3 = \varepsilon_0 \cdot E_3 \cdot 4\pi \cdot R_3^2;$$

$$Q_3 = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 130 \cdot 4\pi \cdot (6,37 \cdot 10^6)^2 = 5,87 \cdot 10^5 [Кл], \quad (3.1)$$

де - $D_3 = 12,756 \cdot 10^6$ м - діаметр Землі.

Наявність грозових хмар порушує нормальне поле землі; концентрація великих об'ємних зарядів у хмарах створює місцеві поля із значною напруженістю та різницею потенціалів між хмарою та землею порядку ~ 10 МВ (напруженість електричного поля $\sim (1000 \dots 2000) В \cdot м^{-1}$).

Грозовий розряд завжди розвивається від хмари вздовж напрямку на землю і в переважній кількості випадків спостерігаються розряди з *від'ємно* заряджених хмар. Все це добре узгоджується з теорією Чарльза Вільсона електризації нейтральної водяної краплинки, яка падає в електричному полі землі. При падінні нейтральної краплинки у хмарі на ній індукуються заряди: зверху - від'ємний, знизу - додатний. Великі краплини під час свого падіння підхоплюють негативні іони своєю нижньою частиною і заряджаються негативно; позитивні іони відштовхуються нижньою частиною краплини, а зверху такі іони не встигають «сісти» на краплину через малу свою рухливість (див. рис. 3.1).

Падаючі від'ємно заряджені великі краплини заряджають низ хмари *негативно*. Дрібні краплини, поляризовані в електричному полі Землі та підхоплені потоком повітря, своєю верхньою частиною захоплюють позитивні

іони і заряджаються позитивно. Винесені потоком повітря у верхню частину хмари, вони заряджають її також *позитивно*.

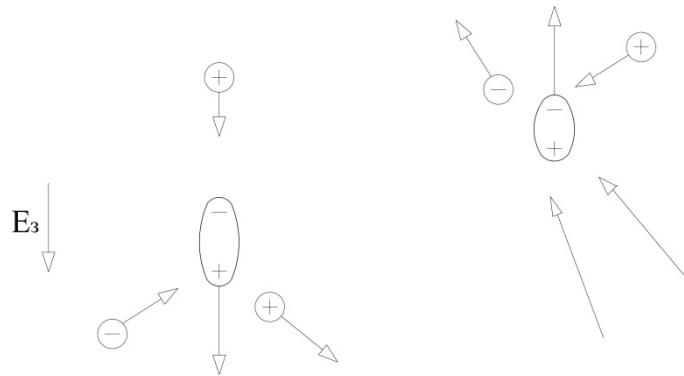


Рис. 3.1 - Електризація водяних краплин у полі Землі

3.2.3 Розвиток розряду блискавки.

Розряд між хмарою і землею розвивається таким чином. Як тільки напруженість електричного поля в деякій точці зарядженої хмари досягне критичної величини, починається ударна іонізація молекул повітря і у напрямку до землі починає проростати слабо світний канал (*лідер-пілот*), який рухається із середньою швидкістю $V_{л} \approx 1,5 \cdot 10^5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Канал *лідера*, як і всякий канал *стрімера*, заповнений плазмою і володіє певною провідністю. Верхнім кінцем лідерний канал з'єднаний з одним із центрів зарядів у хмарі, внаслідок чого частина зарядів цього центру стікає в канал лідера.

В першому наближенні *лідерний канал* можна вважати рівномірно зарядженим з лінійною густиною зарядів q_l . Загальний заряд в каналі лідера рівний $Q_{л} = q_l \cdot l$, де l - довжина каналу, і має на (70 ... 80)% всіх випадків *від'ємну* полярність. Величина цього заряду складає $\sim 10\%$ всього одиничного розряду блискавки.

По мірі руху *каналу лідера* під дією створеного ним електричного поля у землі відбувається зміщення зарядів. При цьому, заряди, протилежні за знаком зарядам лідера (як правило, це *позитивні* заряди), прагнуть розміститися якомога ближче до головки лідерного каналу. У випадку однорідного ґрунту ці заряди накопичуються безпосередньо під лідерним каналом. Якщо ж ґрунт неоднорідний, заряди зосереджуються на ділянках з *підвищеною провідністю* (ріки, озера, ґрунтові води). При наявності заземлених високих об'єктів (блискавковідводи, труби, дерева, змочені дощем) заряди накопичуються на їх вершинах, створюючи там значну напруженість електричного поля.

На перших стадіях розвитку *лідерного каналу* напруженість електричного поля на його голівці визначається власними зарядами лідера та нижньої частини хмари. Траєкторія руху лідера не зв'язана із земними об'єктами. По мірі зниження лідера все більший вплив починають справляти місця *накопичення зарядів* на землі. Починаючи з певної висоти над поверхнею землі головки лідера (*висота орієнтування*), напруженість електричного поля вздовж одного з напрямків виявляється найбільшою і відбувається орієнтування лідера на один з

наземних об'єктів з підвищеною провідністю (*вибіркове ураження*). З високих об'єктів, які мають переважуючу напруженість поля, *назустріч лідеру* розвиваються зустрічні лідери, наявність яких сприяє орієнтуванню блискавки на даний об'єкт.

Після того, як канал лідера досягне землі або зустрічного лідера, починається зворотний (*головний*) розряд, під час якого канал лідера набуває потенціал, практично рівний потенціалу землі (переважно, *позитивний заряд*). На голівці зворотного розряду, який розвивається *вгору*, розміщена зона підвищеної напруженості електричного поля, під дією якої відбувається перебудова каналу, що супроводжується збільшенням густини зарядів плазми від $10^{13} \dots 10^{14}$ до $10^{16} \dots 10^{19} \text{ [м}^{-3}\text{]}$, завдяки чому провідність каналу збільшується в ~ 100 разів.

Внаслідок того, що у хмарі утворюється, як правило, декілька ізольованих один від одного накопичень зарядів, блискавка буває багаторазовою, тобто такою, що складається з декількох одиничних розрядів, які розвиваються на одному і тому ж шляху. При цьому кожний розряд починається *лідерним* і завершується зворотним (*головним*) розрядом. Швидкості *лідерів* цих розрядів досягають величин $\sim 2 \cdot 10^6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, а швидкість зворотного розряду змінюється в границях $(1,5 \cdot 10^7 \dots 1,5 \cdot 10^8) \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, тобто від 0,05 до 0,5 швидкості світла (див. рис. 3.2).

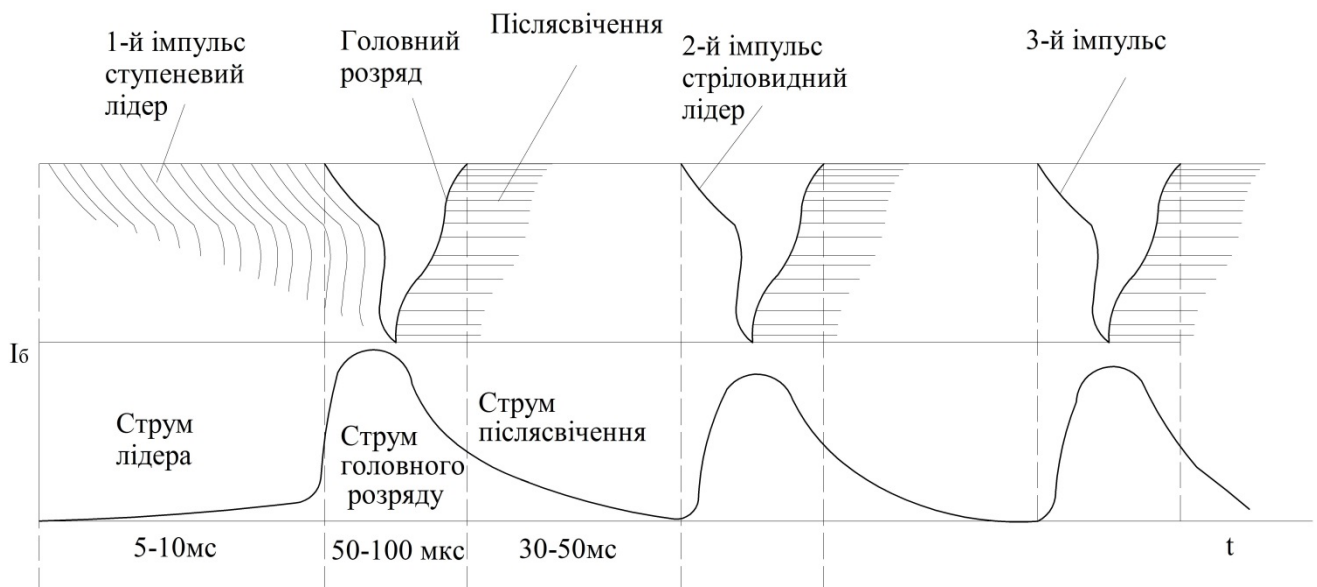


Рис. 3.2 - Стадії розвитку розряду блискавки

Під час розвитку зворотного розряду через місце удару блискавки проходить струм $I_b = q_l \cdot V$, де V - швидкість руху зворотного розряду.

3.2.4 Основні параметри блискавки.

Основною кількісною характеристикою блискавки є *струм*, що протікає через уражений об'єкт, і характеризується своїм максимальним значенням $I_{b \text{ макс}}$,

середньою крутістю фронту $a = \left(\frac{di_{\phi}}{dt} \right)_{cp}$ та тривалістю імпульсу τ_i , яка рівна часу

зменшення струму до половини від максимального значення. «Стандартний» імпульс блискавки має параметри: тривалість фронту $\tau_{\phi} = (1,20 \pm 0,36)$ мкс; тривалість імпульсу $\tau_i = (50,0 \pm 10,0)$ мкс.

Заміри струмів блискавки спеціальними приладами (магнітореєстратори) показали їх великий розкид (від декількох до сотень кілоампер). Тому результати вимірювань представляють у вигляді кривої ймовірностей (інтегральної функції розподілу $F(I_{\phi})$) струмів блискавок (див. рис. 3.3), де по осі абсцис відкладають ймовірність появи струмів блискавки з максимальним значенням, яке перевищує значення ординати $(1 - F(I_{\phi}))$.

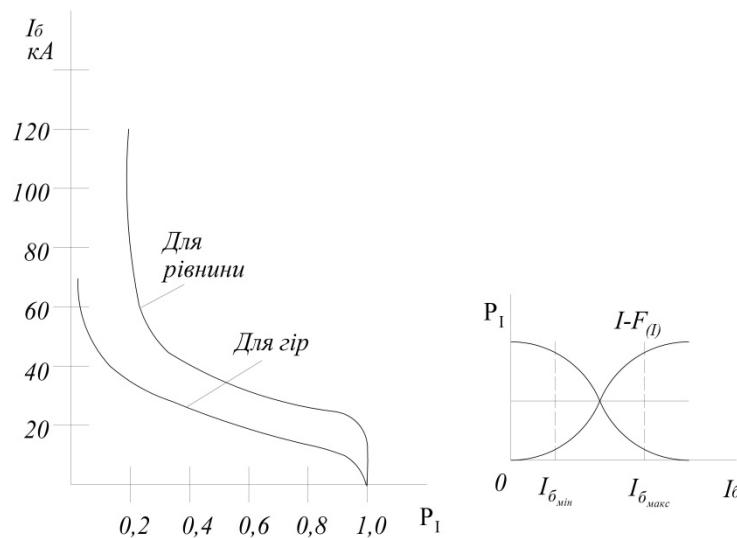


Рис 3.3 - Криві ймовірностей струмів блискавок

При розрахунках грозозахисту використовуються такі вирази експоненційного закону розподілу ймовірностей *струму блискавки*:

$$P_1 = \exp\left(-\frac{I_{\phi}}{26}\right) = 10^{-\frac{I_{\phi}}{60}} \text{ або } \lg P_1 = -\frac{I_{\phi}}{60}, \quad (3.2)$$

де I_{ϕ} - значення струму блискавки, кА;

P_1 - ймовірність того, що максимальне значення струму блискавки більше I_{ϕ} .

Для гірських місцевостей ординати кривої рис. 3.3 зменшуються в ~ 2 рази, тому що при малих відстанях від землі до хмар блискавка виникає при меншій густині зарядів у скупченнях, тобто ймовірність великих струмів зменшується.

Тривалість імпульсу струму блискавки τ_i в основному визначається часом розповсюдження зворотного розряду від землі до хмари і змінюється в межах (20 ... 100) мкс. Середня тривалість імпульсу струму блискавки близька до 50 мкс, що і визначило вибір параметрів «стандартного» *грозового імпульсу* (1,2 / 50 мкс).

Крутість фронту струму блискавки a на фронті також змінюється в

широких межах. Тому результати замірів крутості, аналогічно струму блискавки, оформлюються у вигляді кривих ймовірності згідно експоненційного закону розподілу, а відповідна емпірична формула має вигляд:

$$P_a = \exp\left(-\frac{a}{15,7}\right) = 10^{-\frac{a}{36}} \text{ або } \lg P_a = -\frac{a}{36}, \quad (3.3)$$

де a - крутість фронту струму блискавки, $\text{кА} \cdot \text{мкс}^{-1}$.

Заряд, який стікає в землю під час багатократної блискавки, змінюється в границях $\sim (0,01 \dots 100) \text{ Кл}$. Середнє значення цього заряду близьке до 20 Кл . Заряд, який спускається в землю під час гроз, очевидно, грає суттєву роль у підтриманні від'ємного заряду землі.

3.2.5 Інтенсивність грозової діяльності.

Інтенсивність грозової діяльності в різних кліматичних районах значно різниться. Як правило, кількість гроз протягом року мінімальна в північних районах і поступово збільшується до півдня, де підвищена вологість і висока температура сприяють утворенню грозових хмар. Однак ця тенденція спостерігається не завжди. Існують осередки грозової діяльності і в середніх широтах (наприклад, у районі Києва), де створюються сприятливі умови для формування місцевих гроз.

Інтенсивність грозової діяльності D_g прийнято характеризувати загальною річною тривалістю гроз у годинах і визначається з багаторічних спостережень метеостанцій. Узагальнення їх даних дозволяє скласти карти грозової діяльності, на які наносяться лінії рівної тривалості гроз - *ізокеранічні лінії*. Середня тривалість грози у наших широтах складає (1,5 ... 2) год.

Наприклад, інтенсивність грозової діяльності на території:

- Крим ... Феодосія - (40 ... 60) год.;
- Центральна Україна - (60 ... 80) год.;
- Західна Україна - (80 ... 100) год.;
- Львів ... Тернопіль - більше 100 год.

Середньорічне число n ударів блискавки в 1 км^2 земної поверхні у місці перебування будинку або споруди визначається, виходячи із середньорічної тривалості гроз у годинах за таблицею 3.1.

Таблиця 3.1 - Середньорічне число ударів блискавки в 1 км^2 земної поверхні

Середньорічна тривалість гроз, год.	Щільність ударів блискавки в землю n , ($\text{км}^2 \cdot \text{рік}^{-1}$)
10 ... 20	1
20 ... 40	2
40 ... 60	4
60 ... 80	5 ... 6
80 ... 100	7
більше 100	8 ... 9

Згідно проведених спостережень у районах з числом грозових годин у році

$t = 30$ год. поверхня землі площею 1 км^2 в середньому піддається ураженню 2 рази за 1 рік. Тобто середнє число ударів блискавки n_{yd} на 1 км^2 поверхні за 1 грозову годину рівне $n_{\text{yd}} = 0,067 \frac{1}{\text{км}^2 \cdot \text{год}}$. Ці дані дозволяють оцінити частоту ураження блискавкою різних об'єктів, що височіють над поверхнею землі і «збирають» удари блискавки з площі, що перевищує їх територію, внаслідок розвитку від них зустрічних лідерів.

Так, число ударів блискавки N за 1 грозову годину у споруду, наприклад, в підстанцію довжиною A , шириною B і висотою H (розміри в метрах) може бути розраховане згідно виразу:

$$N = 0,067 \cdot (A + 7 \cdot H) \cdot (B + 7 \cdot H) \cdot 10^{-6} \left[\frac{1}{\text{год}} \right]. \quad (3.4)$$

Число ударів блискавки N за 1 грозову годину у повітряну ЛЕП, довжиною $l = 100$ км розраховується згідно виразу:

$$N = 0,067 \cdot l \cdot 6 \cdot h_{\text{cp}} \cdot 10^{-3} \approx 4 \cdot h_{\text{cp}} \left[\frac{1}{\text{год}} \right], \quad (3.5)$$

де $h_{\text{cp}} = h_{\text{on}} - \frac{2}{3} \cdot f$ - середня висота підвісу тросу або, при відсутності тросів, -

верхнього проводу, м;

h_{on} - висота опори, м;

f - стріла провису тросу або проводу, м.

Число ударів блискавки за 1 рік в ЛЕП довжиною l , м, при кількості грозових годин у році $D_{\text{Г}}$ визначається як

$$N_{\text{р}} = n_{\text{yd}} \cdot \frac{l}{100} \cdot \frac{D_{\text{Г}}}{100} \left[\frac{1}{\text{рік}} \right]. \quad (3.6)$$

3.2.6 Теплова та механічна дії блискавки.

Відомо, що удари блискавки в наземні об'єкти часто супроводжуються пожежами та механічними руйнуваннями. Природно, що засоби захисту від блискавки (блискавковідводи, заземлювачі) повинні витримувати удари блискавки самої великої інтенсивності.

Кількість тепла Q , яке виділяється у провіднику при проходженні струму багатократної блискавки, що складається з m одиночних розрядів, наближено рівна:

$$Q = 0,24 \cdot r \cdot \sum_{k=1}^m \frac{I_k \cdot q_k}{2} \approx 0,12 \cdot I_{\text{cp}} \cdot r \cdot \sum_{k=1}^m q_k \text{ [кДж]}, \quad (3.7)$$

де I_k, q_k - середній струм блискавки, кА, та перенесений у землю заряд, Кл, під час k -того одиночного розряду;

I_{cp} - середній струм багатократної блискавки, кА;

$\sum_{k=1}^m q_k$ - загальний заряд багатократної блискавки, Кл;

r - активний опір провідника із врахуванням поверхневого ефекту, Ом.

Температура t , до якої нагрівається провідник при проходженні розряду, визначається з виразу

$$t = \frac{Q}{s \cdot l \cdot \gamma \cdot c} = \frac{5 \cdot \beta \cdot \rho \cdot I_{cp} \cdot \sum_{k=1}^m q_k}{s^2 \cdot \gamma \cdot c} [\text{град. C}], \quad (3.8)$$

де s - січення провідника, м^2 ;

l - довжина провідника, м ;

γ - питома маса провідника, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$;

c - питома теплоємність, $\text{кДж} \cdot (\text{кг} \cdot \text{град. C})^{-1}$;

ρ - питомий опір провідника, Ом·м;

β - коефіцієнт, який враховує вплив поверхневого ефекту.

Мінімальне січення провідника, яке забезпечує відсутність його руйнування при проходженні струму блискавки, приймається рівним $s_{\text{мін}} \geq 50 \text{ мм}^2$. Стальний провідник з таким січенням протягом 1 с нагрівається до декількох сотень градусів.

При ударах блискавки в об'єкти з поганою провідністю (дерев'яні опори, дерева, цегляні будинки і т. ін.) можуть виникати серйозні руйнування. Це пов'язано з тим, що струм блискавки переважно проходить вздовж шляхів підвищеної провідності, які виникають у внутрішніх частинах об'єктів завдяки їх зволоженню. За рахунок нагрівання та випаровування вологи струмом блискавки всередині об'єкту відбувається різке збільшення тиску, яке і викликає його руйнування.

Підсумок

Атмосферні (зовнішні) перенапруги виникають в електричних установках під час грозових розрядів. Їх розділяють на індуковані і перенапруги прямого удару блискавки.

Грозоопірність лінії електропередачі визначається захисним рівнем та питомим числом відключень.

Блискавка - електричний розряд, джерелом якого є грозова хмара. В установках високої напруги найбільшому ураженню піддані ЛЕП внаслідок свого розташування над поверхнею землі й значної протяжності. Грозовий розряд завжди розвивається від хмари вздовж напрямку на землю і в переважній кількості випадків спостерігаються розряди з від'ємно заряджених хмар.

Починаючи з певної висоти над поверхнею землі головки лідера відбувається орієнтування лідера на один з наземних об'єктів з підвищеною провідністю (вибіркове ураження). Кожний розряд починається лідерним і завершується зворотним (головним) розрядом.

Основною кількісною характеристикою блискавки є струм, що протікає через уражений об'єкт, і характеризується своїм максимальним значенням, середньою крутістю фронту та тривалістю імпульсу. «Стандартний» імпульс

блискавки має параметри: 1,2/50 мкс.

Інтенсивність грозової діяльності - це загальна річна тривалість гроз у годинах.

Мінімальне січення провідника, яке забезпечує відсутність його руйнування при проходженні струму блискавки, приймається рівним 50 мм².

Запитання

Що таке перенапруги індуковані та прямого удару і в чому їх відмінність?

Чим забезпечується грозоопірність ЛЕП? Дайте визначення складових частин грозоопірності.

Назвіть основні заходи, які забезпечують зниження числа відключень ЛЕП при грозових ураженнях.

Який механізм розвитку розряду блискавки? Назвіть поетапно складові частини цього процесу.

Яким чином реагують об'єкти на поверхні землі при проходженні над ними грозової хмари?

Дайте основні характеристики лідерної й головної частини розряду блискавки.

Охарактеризуйте коротко основні кількісні характеристики блискавки.

Яку, на Вашу думку, роль відіграє в глобальному масштабі Землі грозова діяльність природи?

Що таке ізокеранічні лінії і яким чином вони пов'язані з інтенсивністю грозової діяльності?

Чому наземні об'єкти доволі часто руйнуються при ураженні блискавкою?

Лекція 15

[1, с. 232–257; 2, с. 300–312; 4; 7, с. 270–283; 9, с. 440–477; 11; 13; 15; 16]

3.3 Блискавковідводи та їх захисна дія

Блискавковідводи як засіб захисту від прямих ударів блискавки застосовувались задовго до початку нашої ери, але одержали загальне визнання тільки в середині XVIII ст. завдяки роботам Мих. Ломоносова та Бендж. Франкліна.

Призначені блискавковідводи для сприйняття переважного числа прямих ударів блискавки у межах території захисту та відведення струму блискавки у землю.

Кожний **блискавковідвід** складається з *блискавкоприймача*, що височіє над об'єктом захисту, *заземлювача* та *струмоводу*, який з'єднує блискавкоприймач із заземлювачем. Щодо типу блискавкоприймачів розрізняють *стрижневі* та *тросові* блискавковідводи. Стрижневі блискавковідводи виконуються у вигляді вертикально встановлених стрижнів (мачт), з'єднаних із заземлювачем, а тросові – у вигляді горизонтально підвішуваних тросів. Металічний стрижневий блискавковідвід або опора одночасно виконують функції струмоводу.

Захисна дія блискавковідводу заснована на явищі вибіркового ураження блискавкою високих об'єктів. Якщо *голівка лідера* на висоті орієнтування блискавки знаходиться у точці, розміщеній над блискавковідводом, розряд блискавки пройде блискавковідводом. При віддаленні точки орієнтування від блискавковідводу збільшується ймовірність удару блискавки в землю.

Якщо на певній відстані від блискавковідводу розташований більш низький по висоті об'єкт захисту, а розрядна напруга проміжку: *лідер блискавки - об'єкт* буде більшою від розрядних напруг проміжків: *лідер блискавки - блискавковідвід* та *лідер блискавки - земля*, - об'єкт буде захищеним від прямого ураження блискавкою.

Необхідною умовою надійного захисту є добротне заземлення блискавковідводу, т.я. при ударі блискавки у ненадійно заземлений блискавковідвід на ньому індукується висока напруга, здатна викликати пробій середовища (повітря чи земля) із блискавковідводу до об'єкту захисту.

3.3.1 Зони захисту блискавковідводів.

Зоною захисту прийнято називати певний простір навколо блискавковідводу, при розташуванні в якому об'єкту захисту, прямі удари блискавки у нього можливі з дуже малою ймовірністю (до 0,001) внаслідок статичного розкиду розрядних напруг.

Зони захисту блискавковідводів визначаються дослідним шляхом на *моделях*. При цьому приймається, що зони захисту реальних блискавковідводів *геометрично подібні* зонам, отриманим для лабораторних моделей. В якості «моделі» блискавки використовується *імпульсний іскровий розряд*, який у довгих

проміжках має дві основні стадії розвитку розряду: *лідерну* та *головну* і володіє, таким числом, якісною схожістю з блискавкою.

Визначення зони захисту відбувається таким чином. Електрод 1, розміщений на висоті H (див. рис 3.4), зміщується відносно моделі блискавковідводу в горизонтальному напрямку. Дослід виявляє, що при $R \leq 2,5 \cdot h$ всі розряди уражають блискавковідвід. При $R_1 \geq R$ частина розрядів попадає в землю на відстані r від блискавковідводу. Мінімальна величина r_0 є радіусом зони захисту на рівні землі.

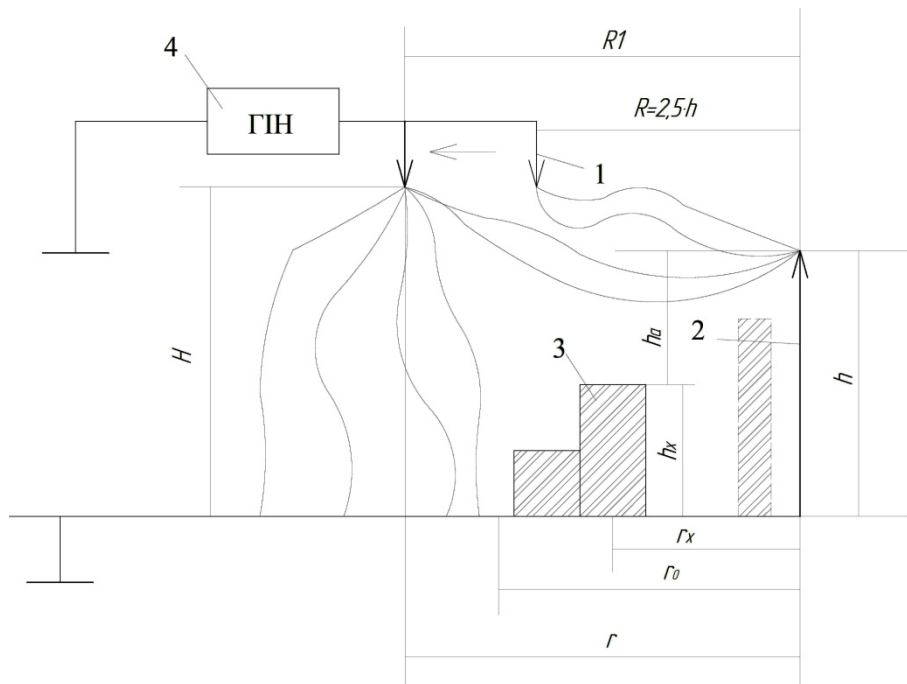


Рис. 3.4 - Визначення на моделі зони захисту стрижневого блискавковідводу:

- 1 - електрод, який імітує кінець лідерного каналу на висоті орієнтування;
- 2 - модель блискавковідводу;
- 3 - модель об'єкту захисту;
- 4 - генератор імпульсних напруг

Визначення зони захисту на висоті h_x відбувається за допомогою стрижня висотою h_x , який імітує об'єкт захисту. При кожному взаємному розміщенні електродів: верхнього, моделі блискавковідводу та моделі об'єкту виробляється певне число розрядів. В результаті знаходиться максимальна відстань (радіус) r_x між об'єктом та блискавковідводом, при якій об'єкт не уражується розрядами.

Перевищення висоти блискавковідводу над висотою об'єкту захисту називають *активною висотою* блискавковідводу: $h_a = h - h_x$.

3.3.2 Одиночний стрижневий блискавковідвід.

Зона захисту одиночного стрижневого блискавковідводу висотою

$h \leq 150$ м представляє собою круговий конус (див. рис 3.5) з вершиною на висоті $h_0 \leq h$, січення якого на висоті об'єкту h_x має радіус r_x і описується такими співвідношеннями, м:

– при ймовірності прориву блискавки P_{np} через границю зони, що не перевищує значення $P_{np} = 0,005$:

$$\left. \begin{aligned} h_0 &= 0,92 \cdot h \\ r_x &= (1,1 - 0,002 \cdot h) \cdot \left(h - \frac{h_x}{0,92} \right) \end{aligned} \right\}; \quad (3.9)$$

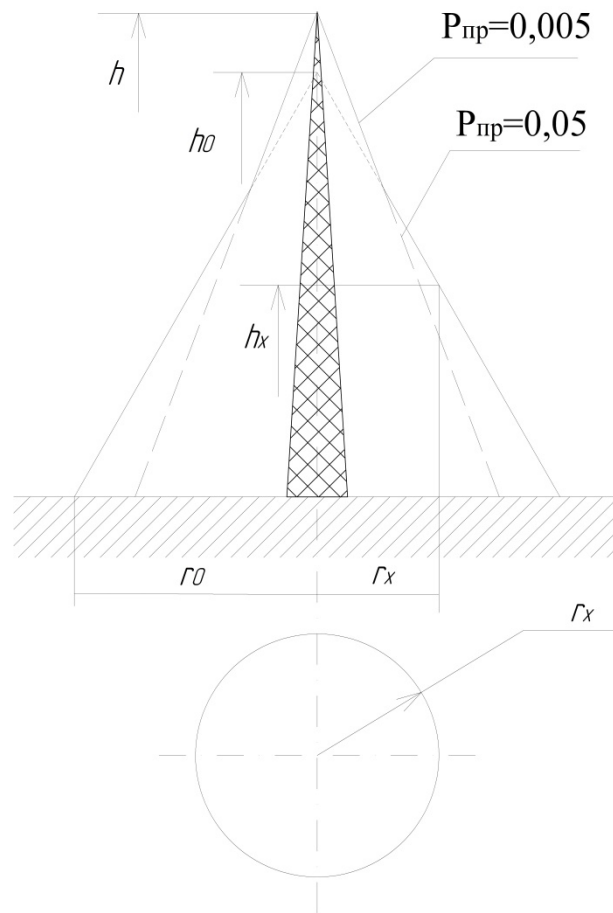


Рис. 3.5 - Зона захисту одиночного стрижневого блискавковідводу та її спрощена побудова

– при ймовірності прориву блискавки $P_{np} = 0,05$ зона захисту значно розширюється:

$$\left. \begin{aligned} h_0 &= 0,85 \cdot h \\ r_x &= 1,5 \cdot \left(h - \frac{h_x}{0,85} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (3.10)$$

тобто ймовірність ураження зменшується з віддаленням від землі.

3.3.3 Два стрижневих блискавковідводи.

Зона захисту двох стрижневих блискавковідводів (див. рис. 3.6) має значно більші розміри, ніж сума зон захисту двох одиночних блискавковідводів. Справді при $R \leq 2,5 \cdot h$ всі розряди припадають на блискавковідвід (величина R називається радіусом 100%-го ураження). Очевидно, що два блискавковідводи, які розташовані на відстані $l = 2 \cdot R \leq 5 \cdot h$ один від одного надійно захищають точку на рівні землі, розташовану посередині між ними.

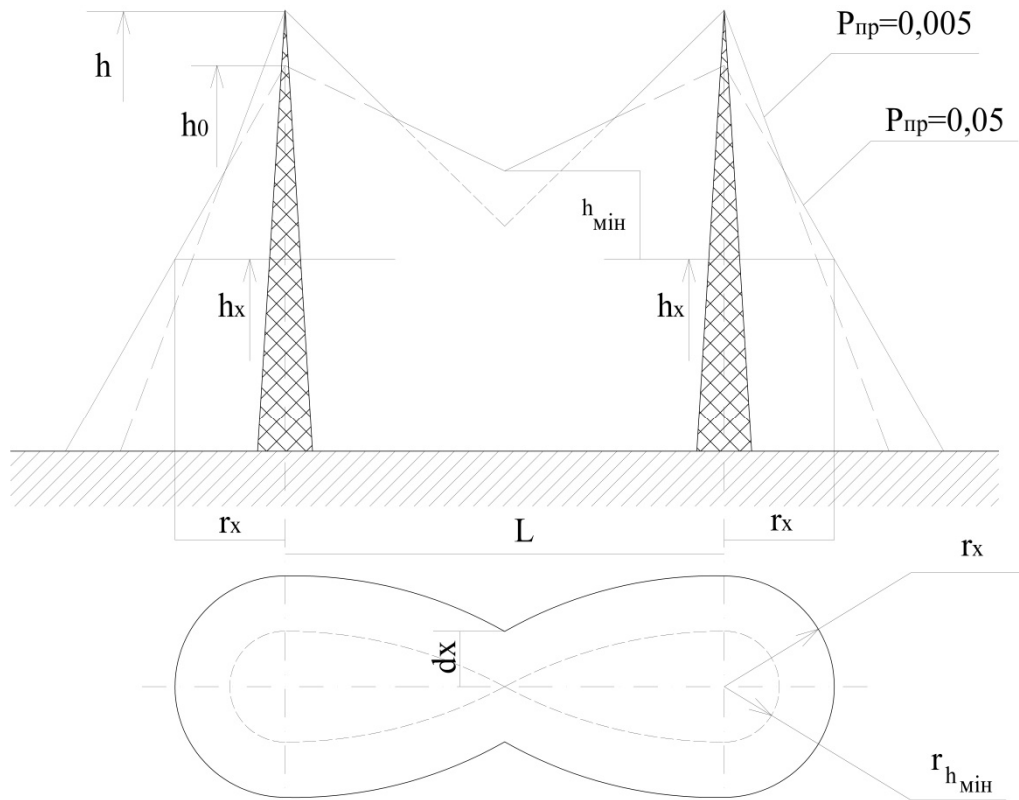


Рис. 3.6 - Зона захисту двох стрижневих блискавковідводів та її спрощена побудова

Зони захисту подвійного стрижневого блискавковідводу описуються такими виразами, м:

– при ймовірності прориву блискавки P_{np} через границю зони, що не перевищує значення $P_{np} = 0,005$:

$$\left. \begin{aligned}
 h_{\min} &= \begin{cases} h_0 & \text{при } l \leq h, \\
 h_0 - (0,17 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot h) \cdot (l - h) & \text{при } l \geq h \end{cases} \\
 d_x &= \begin{cases} r_x & \text{при } l \leq h, \\
 r_0 \cdot \frac{h_{\min} - h_x}{h_{\min}} & \text{при } l \geq h \end{cases}
 \end{aligned} \right\}; \quad (3.11)$$

– при ймовірності прориву блискавки:

$$\left. \begin{aligned}
 h_{\min} &= \begin{cases} h_0 & \text{при } l \leq 1,5 \cdot h, \\
 h_0 - 0,14 \cdot (l - h) & \text{при } l \geq 1,5 \cdot h \end{cases} \\
 d_x &= \begin{cases} r_x & \text{при } l \leq 1,5 \cdot h, \\
 r_0 \cdot \frac{h_{\min} - h_x}{h_{\min}} & \text{при } l \geq 1,5 \cdot h \end{cases}
 \end{aligned} \right\}; \quad (3.12)$$

де r_0 - зона захисту одиночного блискавковідводу на рівні землі ($h_x = 0$).

Якщо відстань l між блискавковідводами перевищує $3 \cdot h$ для $P_{np} = 0,005$ або $5 \cdot h$ для $P_{np} = 0,05$, кожний з блискавковідводів слід розглядати як одиночний.

3.3.4 Системи з трьох чи чотирьох блискавковідводів.

Такі об'єкти, як відкриті розподільчі пристрої підстанцій, розміщуються на достатньо великій території і тому захищаються декількома блискавковідводами. При цьому, зовнішня частина зони захисту визначається так же, як і у випадку двох блискавковідводів (див рис. 3.6 та 3.7).

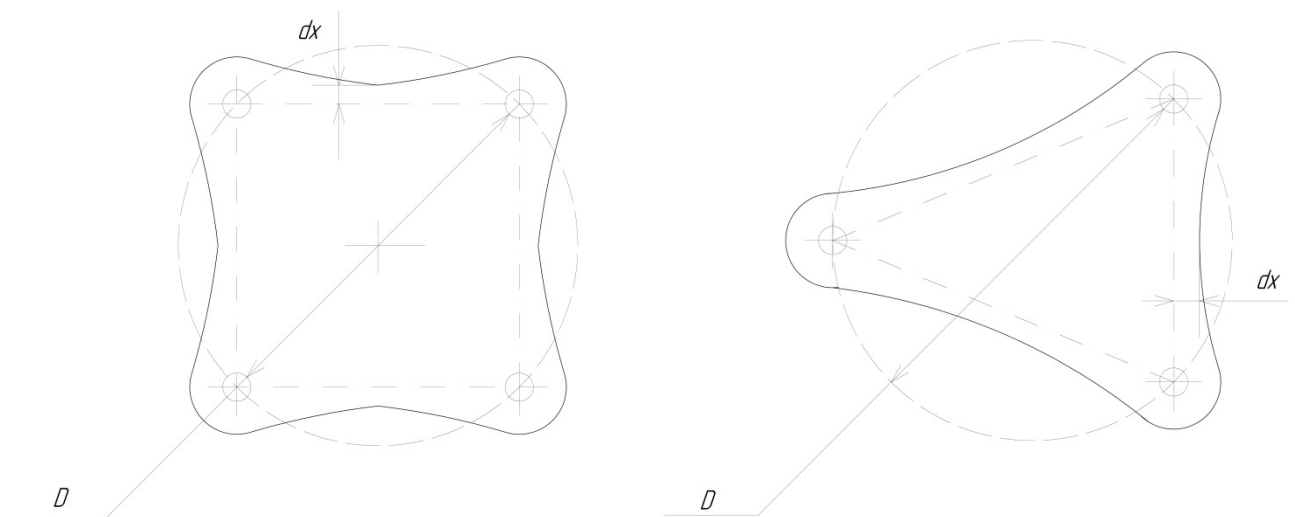


Рис. 3.7 - Зони захисту трьох та чотирьох блискавковідводів

Об'єкт висотою h_x , який знаходиться під поверхнею зони захисту, буде надійно захищеним, якщо діаметр кола D , проведеного через місця встановлення блискавковідводів, відповідатиме співвідношенню:

$$D \leq 8 \cdot p \cdot (h - h_x), \quad (3.13)$$

де $p = 1$ при $h \leq 30$ м;

$$p = \sqrt{\frac{30}{h}} = \frac{5,5}{\sqrt{h}} \text{ при } h = (30 \dots 100) \text{ м.}$$

3.3.5 Одиночний тросовий блискавковідвід.

Для захисту протяжних об'єктів (наприклад, лінії електропередачі) тросові блискавковідводи натягують над об'єктом захисту і надійно заземлюють (наприклад, на опорах) як показано на рис. 3.8.

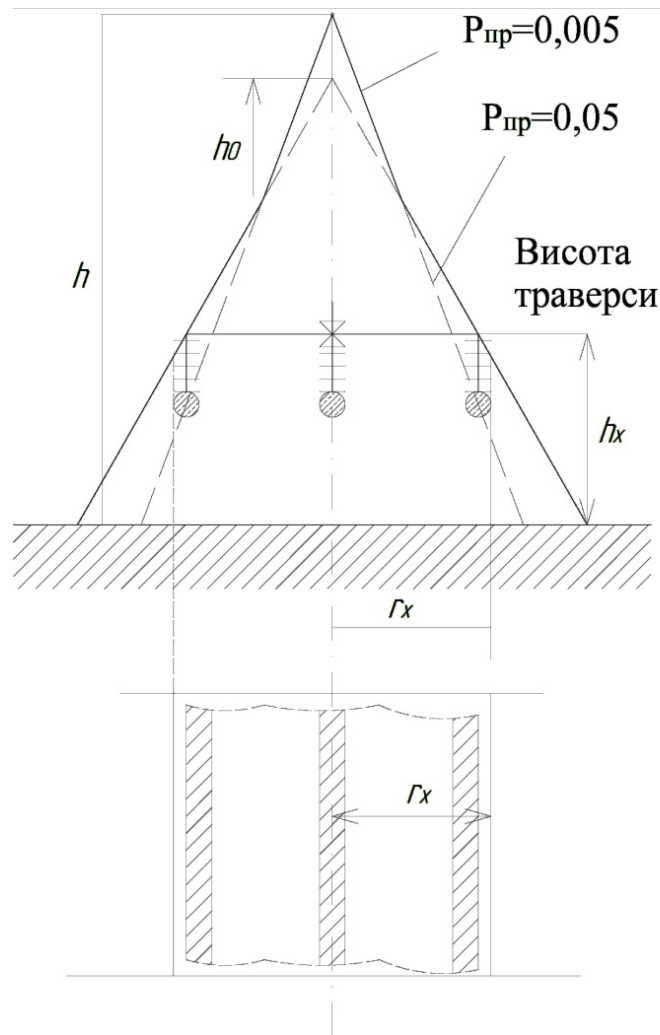


Рис. 3.8 - Зона захисту одиночного тросового блискавковідводу

Зона захисту одиночного тросового блискавковідводу визначається з виразів:

– при ймовірності прориву блискавки $P_{пр}$ через границю зони, що не перевищує значення $P_{пр} = 0,005$:

$$\left. \begin{aligned} h_0 &= 0,92 \cdot h \\ r_x &= 1,7 \cdot \left(h - \frac{h_x}{0,92} \right) \end{aligned} \right\}; \quad (3.14)$$

– при ймовірності прориву блискавки $P_{пр} = 0,05$:

$$\left. \begin{aligned} h_0 &= 0,85 \cdot h \\ r_x &= (1,35 - 0,0025 \cdot h) \cdot \left(h - \frac{h_x}{0,85} \right) \end{aligned} \right\}. \quad (3.15)$$

3.3.6 Подвійний тросовий блискавковідвід.

Зовнішня частина зони захисту двох паралельних тросових блискавковідводів, розміщених на відстані l , один від одного (див. рис. 3.9) визначається так же, як і для одиночного тросу. Внутрішня частина захисної поверхні, пересічена площиною, перпендикулярною до тросів, дає дугу кола; ця дуга проходить через три точки: два троси і точку посеред них на висоті h_{\min} :

$$h_{\min} = \begin{cases} h_0 & \text{при } l \leq h, \\ h_0 - (0,14 + 5 \cdot 10^{-4} \cdot h) \cdot (l - h) & \text{при } l \geq h. \end{cases} \quad (3.16)$$

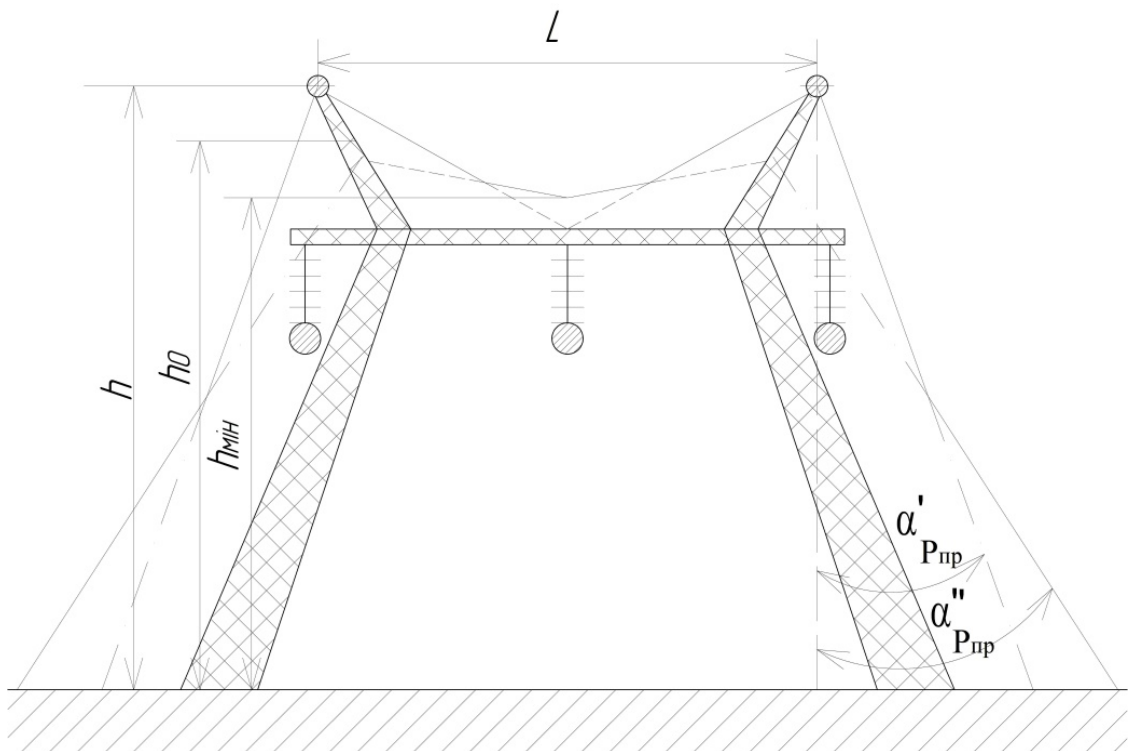


Рис. 3.9 - Зона та кут захисту α_p подвійного тросового блискавковідводу на повітряній ЛЕП:

$\alpha'_{P_{пр}}$ - кут захисту при ймовірності «прориву» удару блискавки $P_{пр} = 0,005$;

$\alpha''_{P_{пр}}$ - кут захисту при ймовірності «прориву» удару блискавки $P_{пр} = 0,05$

Якщо виконується умова (3.16), то середній провід ЛЕП гарантовано виявляється захищеним від ударів блискавки.

При розгляді умов захисту зовнішніх проводів (або будь-якого проводу при одному тросі) часто користуються поняттям не зони захисту, а кута захисту α (див. рис. 3.9). Для захисної зони на висоті більше $0,7 \cdot h$ реально встановлено, що кут захисту $\alpha = \arctg 0,6 = 31^\circ$.

Наявність захисних тросів не гарантує 100%-у надійність захисту ЛЕП: завжди існує деяка ймовірність ураження проводу - «прориву» блискавки повз

тросовий захист. На відміну від підстанцій, території яких піддаються прямим ударам блискавки 1 раз на декілька років, високовольтні лінії - десятки разів за грозовий сезон. Так, лінія електропередачі номіналом 500 кВ та протяжністю 300 км у зоні з інтенсивністю грозової діяльності 60 год. на рік піддається ураженням блискавки (150 ... 200) разів. Тому навіть невелика ймовірність «прориву» блискавки має суттєве значення. Ця ймовірність підраховується згідно формули:

$$\lg P_{\alpha} = \frac{\alpha \cdot \sqrt{h_{on}}}{90} - 4, \quad (3.17)$$

де h_{on} - висота опори ЛЕП, м.

Так, при куті захисту $\alpha = 30^{\circ}$ та висоті опори $h_{on} = 16$ м ймовірність «прориву» блискавки $P_{\alpha} \approx 0,002$, а при $h_{on} = 36$ м ймовірність $P_{\alpha} \approx 0,01$. Для зниження ймовірності «прориву» блискавки повз трос зменшують захисні кути на високих опорах шляхом розсування тросокріпильних стояків до кінця траверси так, щоб кут захисту був у межах $20^{\circ} \leq \alpha \leq 30^{\circ}$.

3.4 Заземлення блискавковідводів

Для облаштування заземлення блискавковідводів застосовують вертикальні та горизонтальні електроди (заземлювачі). Для горизонтальних заземлювачів використовується смугова сталь шириною (20 ... 40) мм та товщиною не менше 4 мм, а також сталь круглого сечення діаметром не менше 6 мм. В якості вертикальних заземлювачів застосовують сталеві труби, стержні та профільну сталь. На підстанціях заземлювач представляє собою складну систему у вигляді сітки горизонтальних смуг, яка об'єднує вертикальні електроди на всій площі підстанції. На лініях електропередачі в якості заземлювача опір використовуються, як правило, їх залізобетонні фундаменти.

Заземлювач характеризується значенням опору, який справляє оточуюча земля струму, що стікає з нього. Опір заземлювача залежить від його геометричних розмірів та питомого опору ґрунту ρ , у якому він перебуває.

Опір заземлення (стаціонарний) стрижневого блискавковідводу або лінійної опори, Ом:

– опір вертикальної труби чи стержня:

$$R_{\sim} = \frac{\rho'}{2\pi \cdot l} \cdot \ln \left[\frac{4l \cdot (2t + l)}{d \cdot (4t + l)} \right], \quad (3.18)$$

– опір горизонтальної смуги (круглого проводу):

$$R_{\sim} = \frac{\rho'}{\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{1,5 \cdot l}{\sqrt{b \cdot t}} \quad \text{або} \quad R_{\sim} = \frac{\rho'}{2\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l^2}{d \cdot t}, \quad (3.19)$$

– опір залізобетонного фундаменту:

$$R_{\sim} = 1,7 \cdot \frac{\rho'}{2\pi \cdot t} \cdot \ln \frac{4t}{b}, \quad (3.20)$$

де l - довжина труби чи смуги, м;

t - глибина залягання смуги, верхнього кінця вертикального електрода або

- нижнього кінця фундаменту, m ;
 b - ширина смуги або фундаменту, m ;
 d - діаметр труби чи стержня, m ;
 ρ' - розрахункове значення питомого опору ґрунту, $Om \cdot m$.

Розрахункове значення ρ' визначається згідно даних вимірювань як

$$\rho' = k \cdot \rho_{вим}, \quad (3.21)$$

де k - сезонний коефіцієнт ($k = 1,4$ - замір ґрунту сухого чи середньої вологості;
 $k = 2,6$ - замір ґрунту підвищеної вологості);

$\rho_{вим}$ - заміряне значення питомого опору ґрунту (при змінній напрузі і порівняно невеликому струмі), $Om \cdot m$.

Орієнтовні значення питомого опору ρ^* деяких ґрунтів подані в табл. 3.2. При цьому слід мати на увазі, що питомий опір річкової води дорівнює (10 ... 30) $Om \cdot m$, а морської води - (1 ... 10) $Om \cdot m$.

Таблиця 3.2 - Орієнтовний питомий опір ґрунтів

Ґрунт	ρ^* , $Om \cdot m$
Вічномерзлий	100000
Скельна порода	1000
Пісок	500
Супіщаний	300
Суглинний	100
Глина	60
Чорнозем	50
Торф	20

При великих імпульсних струмах - *струмах блискавки* - густина струму $j [kA \cdot m^{-2}]$, який проходить через заземлюючі електроди, велика. Тому, біля поверхні електродів створюються дуже великі напруженості електричного поля $E = j \cdot \rho$, які перевищують пробивні напруженості ґрунту. Навколо електродів утворюються *зони іскріння* (див. рис. 3.10), які збільшують ефективні розміри електродів. Як наслідок, опір заземлення зменшується.

З іншого боку, швидке наростання струму блискавки на фронті імпульсу створює спад напруги на *індуктивності* протяжного заземлювача, що обмежує відвід струму з віддалених його частин. Як результат - опір заземлення збільшується.

В результаті дії обох факторів опір заземлення при проходженні струму блискавки, т. з. *імпульсний опір* R_i , - відрізняється від *стаціонарного опору* заземлення R , заміряного при змінній напрузі і невеликих струмах або розрахованого згідно (3.18) ... (3.20).

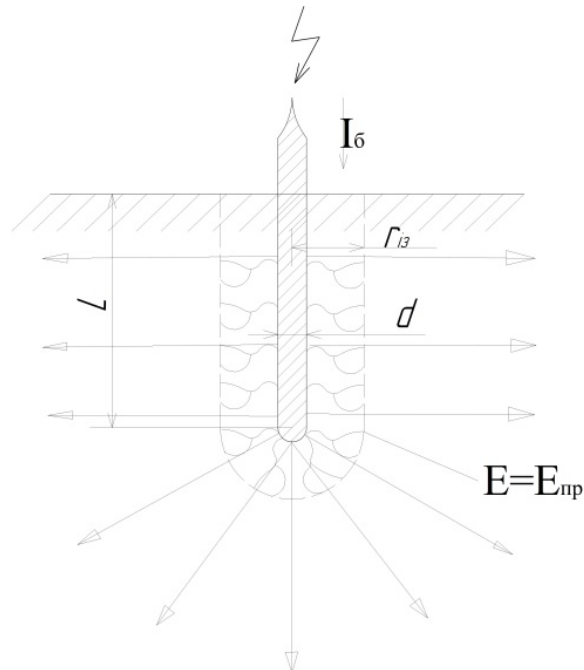


Рис. 3.10 - Іскрова зона навколо вертикального електроду

Відношення імпульсного і стаціонарного опорів заземлення називається *імпульсним коефіцієнтом*:

$$\alpha_i = \frac{R_i}{R_{\sim}}. \quad (3.22)$$

Нехай струм блискавки I_0 , кА, «стікає» з вертикального заземлювача у вигляді стержня з глибиною залягання верхнього кінця $t = 0$ (3.18). На границі іскрової зони (див. рис. 3.10), яка представляє собою циліндричну поверхню радіуса r_{i3} , напруженість електричного поля

$$E = E_{np} = j \cdot \rho' = \frac{I_0}{2\pi \cdot r_{i3} \cdot l} \cdot \rho'.$$

Звідси витікає, що радіус циліндричної іскрової зони r_{i3} буде рівний:

$$r_{i3} = \frac{I_0}{2\pi \cdot E_{np} \cdot l} \cdot \rho'. \quad (3.23)$$

З іншого боку, імпульсний опір заземлення легко знайти, виходячи з міркувань про заземлювач як джерело заряду і, застосувавши теорему Гауса, після ряду перетворень можна записати:

$$R_i = \frac{\rho'}{2\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{2l}{r_{i3}} = \frac{\rho'}{2\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{4\pi \cdot l^2 \cdot E_{np}}{I_0 \cdot \rho'}. \quad (3.24)$$

Виходячи з (3.22) та (3.18) при $t = 0$ імпульсний коефіцієнт

$$\alpha_i = \frac{R_i}{R_{\sim}} = \frac{\ln \frac{4\pi \cdot l^2 \cdot E_{np}}{I_0 \cdot \rho'}}{\ln \frac{4l}{d}}. \quad (3.25)$$

З (3.24) та (3.25) видно, що імпульсний коефіцієнт α_i залежить від добутку

струму через заземлювач й розрахункового (чи орієнтовного) питомого опору ґрунту у місці розташування заземлювача $I_0 \cdot \rho'$. Ця залежність для вертикальних заземлювачів подана на рис. 3.11. Компактні заземлювачі мають тим менший імпульсний опір R_i , чим більший струм блискавки, який проходить через заземлювач, і вищий питомий опір ґрунту.

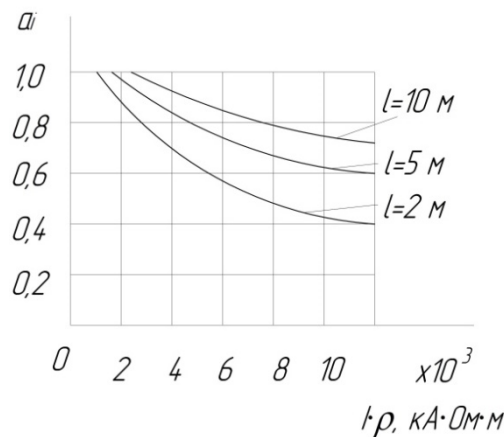


Рис. 3.11 - Імпульсні коефіцієнти вертикальних електродів різної довжини в залежності від добутку $I \cdot \rho$ при $E_{np} = 12 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$

Аналіз протяжного горизонтального заземлювача без врахування іскрових процесів призводить до такого виразу для імпульсного коефіцієнта:

$$\alpha_i = 1 + \frac{L_0 \cdot l}{3\tau_\phi \cdot R_-} \quad (3.26)$$

де $L_0 = 0,2 \cdot \left(\ln \frac{l}{r} - 0,31 \right)$ - індуктивність одиниці довжини горизонтального заземлювача радіуса r , $\text{мкГн} \cdot \text{м}^{-1}$;

τ_ϕ - тривалість фронту струму блискавки, мкс .

Якщо заземлювач складається з n труб чи смуг, його імпульсний опір рівний:

$$R_i = \alpha_i \cdot \frac{R_-}{\eta_i \cdot n}, \quad (3.27)$$

де $0,75 \leq \eta_i \leq 1$ - імпульсний коефіцієнт використання заземлювача, який враховує погіршення умов розтікання струму блискавки внаслідок взаємного екранування електродів.

Опір (стаціонарний) заземлювача *підстанції* системи електропостачання у вигляді *сітки*, яка складається з вертикальних електродів, об'єднаних горизонтальними смугами, розраховується згідно емпіричного виразу:

$$R_- = \rho' \cdot \left(\frac{A}{\sqrt{S}} + \frac{1}{L + n \cdot l} \right), \quad (3.28)$$

де L - сумарна довжина всіх горизонтальних заземлюючих електродів (смуг), м ;
 n та l - число та довжина вертикальних електродів, відповідно, м ;

S - площа, охоплена заземлювачем, m^2 ;

ρ' - розрахункове значення питомого опору ґрунту, $Om \cdot m$;

A - коефіцієнт, який визначається відношенням $\frac{l}{\sqrt{S}}$:

$\frac{l}{\sqrt{S}}$	0	0,05	0,1	0,2	0,5
A	0,44	0,40	0,37	0,33	0,26

Для протяжних заземлювачів при умові, що $\sqrt{S} \geq 10 m$, імпульсний коефіцієнт можна оцінити згідно такого виразу:

$$\alpha_i = \sqrt{\frac{1500 \cdot \sqrt{S}}{(\rho + 320) \cdot (I_{\sigma} + 45)}}, \quad (3.29)$$

де I_{σ} - струм блискавки, kA .

3.5 Умови безпечного проходження струму блискавки вздовж блискавковідводу

При проходженні струму блискавки вздовж блискавковідводу створюється спад напруги на *опорі заземлювача* блискавковідводу й на *індуктивності струмоводу*. При косокутній формі фронту струму блискавки та крутості фронту a максимальний потенціал $U_{l \text{ макс}}$ у точці блискавковідводу, розміщеній на відстані l від заземлювача, настає у момент максимуму струму блискавки $I_{\sigma \text{ макс}}$:

$$U_{l \text{ макс}} = I_{\sigma \text{ макс}} \cdot R_i + a \cdot L_0 \cdot l, \quad (3.30)$$

де L_0 - індуктивність одиниці довжини струмовідводу, $mкГн \cdot m^{-1}$.

$L_0 \approx 1,7 mкГн \cdot m^{-1}$ для металічних блискавковідводів решітчастої конструкції, а також для окремо проведених струмовідвідних спусків.

При розрахунках грозозахисту *підстанцій* приймають $I_{\sigma} = 60 kA$; $a = 30 kA \cdot mкс^{-1}$. В такому разі відстань повітрям l_n , m , до об'єкту захисту, яка унеможливуватиме перекриття грозового розряду на цей об'єкт, з врахуванням струму блискавки і допустимої напруженості електричного поля у повітрі $E_{\text{дон}} = 500 kB \cdot m^{-1}$ визначається з виразу:

$$l_n \geq \frac{60 \cdot R_i + 30 \cdot 1,7 \cdot l}{500} \approx 0,12 \cdot R_i + 0,1 \cdot l. \quad (3.31)$$

Відстань у землі l_3 між заземлювачем окремо розміщеного блискавковідводу та найближчою до нього точкою об'єкту захисту у землі при допустимій напруженості електричного поля у землі $E_{\text{дон}} = 300 kB \cdot m^{-1}$ розраховується як:

$$l_3 \geq \frac{60 \cdot R_i}{300} = 0,2 \cdot R_i. \quad (3.32)$$

При цьому при встановленні блискавковідводу слід дотримуватися таких загальних положень: $l_n \geq 5 m$, $l_3 \geq 3 m$; січення сталевих блискавкоприймачів

$S = (50 \dots 100) \text{ мм}^2$; багатодітні сталі троси - *оцинковані*; блискавкоприймачі і струмовідводи - *фарбуються* від корозії; з'єднання частин блискавковідводів - *зварне*; конструкція блискавковідводів - вільно стояча, *без розтяжок*.

Підсумок

Кожний блискавковідвід складається з блискавкоприймача, що височіє над об'єктом захисту, заземлювача та струмоводу. Розрізняють стрижневі та тросові блискавковідводи.

Захисна дія блискавковідводу заснована на явищі вибіркового ураження блискавкою високих об'єктів. Необхідною умовою надійного захисту є добротне заземлення блискавковідводу,

Зоною захисту прийнято називати певний простір навколо блискавковідводу, при розташуванні в якому об'єкті захисту, прямі удари блискавки у нього можливі з дуже малою ймовірністю (до 0,001) внаслідок статичного розкиду розрядних напруг.

Зона захисту одиночного стрижневого блискавковідводу представляє собою круговий конус з вершиною на його висоті. Зона захисту двох стрижневих блискавковідводів має значно більші розміри, ніж сума зон захисту двох одиночних блискавковідводів. Для захисту протяжних об'єктів (наприклад, лінії електропередачі) тросові блискавковідводи натягують над об'єктом захисту і надійно заземлюють (наприклад, на опорах).

Наявність захисних трасів не гарантує 100%-у надійність захисту ЛЕП: завжди існує деяка ймовірність ураження проводу - «прориву» блискавки повз тросовий захист.

Для облаштування заземлення блискавковідводів застосовують вертикальні та горизонтальні електроди (заземлювачі). Для горизонтальних заземлювачів використовується смугова сталь шириною (20 ... 40) мм та товщиною не менше 4 мм, а також сталь круглого сечення діаметром не менше 6 мм. В якості вертикальних заземлювачів застосовують сталі труби, стержні та профільну сталь.

Опір заземлювача залежить від його геометричних розмірів та питомого опору ґрунту, у якому він перебуває.

Відношення імпульсного і стаціонарного опорів заземлення називається імпульсним коефіцієнтом.

При проходженні струму блискавки вздовж блискавковідводу створюється спад напруги на опорі заземлювача блискавковідводу й на індуктивності струмоводу.

Відстань блискавковідводу до об'єкту захисту, яка унеможливує перекриття грозового розряду на об'єкт, визначається з врахуванням струму блискавки і допустимої напруженості електричного поля як у повітрі, так і в землі.

Запитання

Що таке перенапруги індуковані та прямого удару і в чому їх відмінність?

Чим забезпечується грозоопірність ЛЕП? Дайте визначення складових частин грозоопірності.

Назвіть основні заходи, які забезпечують зниження числа відключень ЛЕП при грозових ураженнях.

Які складові частини блискавковідводів? Назвіть основні їх типи.

У чому суть механізму захисту блискавковідводів?

Як формується зона захисту блискавковідводу? Назвіть основні типи блискавковідводів.

У чому суть ймовірності ураження об'єкту, що знаходиться у зоні захисту блискавковідводу?

Що таке кут захисту блискавковідводу?

Яка роль заземлення блискавковідводу? Назвіть основні конструктивні виконання.

Які чинники найбільше впливають на опір заземлювача?

Як впливає зона іскріння заземлювача на його ефективність?

Дайте визначення імпульсного коефіцієнту заземлення блискавковідводу та коефіцієнту використання заземлювача.

У яких випадках можливе перекриття захисної відстані між блискавковідводом й об'єктом захисту? На яких елементах блискавковідводу утворюється небезпечний потенціал?

Дайте основні положення конструктивного виконання ефективного блискавковідводу.

ЛЕКЦІЯ 16

[2, с. 336–355; 3, с. 97–124; 6, с. 175–181; 7, с. 309–327; 8, с. 304–339; 16]

3.6 Блискавкозахист повітряних ліній електропередачі

3.6.1 Загальні положення блискавкозахисту ЛЕП.

Грозові перенапруги на лініях електропередачі виникають як під час безпосередніх уражень ліній грозовими розрядами (перенапруги прямого удару блискавкою) так і при розрядах блискавки в землю поблизу лінії (індуковані перенапруги). Перенапруги прямого удару блискавки представляють найбільшу небезпеку і грозозахист ліній орієнтується саме на цей вид перенапруг.

Як відомо, удар блискавки в об'єкт може відбутися, якщо головка лідерного каналу на висоті орієнтування знаходиться в межах деякої відстані від об'єкту (для ЛЕП - трикратна її висота). Таким чином, лінія довжиною L , км, із середньою висотою підвісу h_{cp} , м, приймає на себе удари блискавки з площі $S = 2 \cdot 3 \cdot h_{cp} \cdot L \cdot 10^{-3} \text{ [км}^2\text{]}$.

Оскільки число ударів на 1 км^2 за одну грозову годину рівне 0,067, кількість уражень N лінії за 1 рік при D_G грозових годинах у році рівна:

$$N_{уд} = 0,067 \cdot D_G \cdot 6 \cdot h_{cp} \cdot L \cdot 10^{-3} = 0,4 \cdot D_G \cdot h_{cp} \cdot L \cdot 10^{-3}. \quad (3.33)$$

Наприклад, ЛЕП протяжністю 300 км у помірних широтах ($D_G = 40$; $h_{cp} = 15 \text{ м}$) буде уражатись 72 рази в рік.

Ураження блискавкою *фазного проводу* ЛЕП, яке супроводжується проходженням великого струму, створює на проводі таку високу імпульсну напругу, що практично неможливо створити ізоляцію, яка могла б її витримати. Тому, в більшості випадків лінії на металічних опорах мають один або два заземлених троси, які підвішуються вище фазних проводів і сприймають на себе удар блискавки. Однак, наявність тросів не виключає можливості появи високих потенціалів на вершині металічної опори при прямих ударах в неї блискавки навіть при малих імпульсних опорах заземленої опори. Високий потенціал на опорі може стати причиною розряду з опори на фазний провід (зворотне перекриття).

Наявність тросів не виключає також, хоча з малою ймовірністю, удару блискавки у фазний провід. Ріст номінальних напруг і відповідне збільшення висоти опор створюють умови, які перешкоджають здійсненню захисту фазних проводів.

Число перекриття n_{np} лінійної ізоляції менше від числа ударів $N_{уд}$ блискавки у лінію в P_{np} разів, де P_{np} - ймовірність перекриття ізоляції лінії, яку можна оцінити, виходячи з параметрів лінії, імпульсної міцності гірлянд ізоляторів ($U_{50\%}$) та ймовірності струмів блискавки (P_I).

Вдоль шляху перекриття ізоляції лінії проходить струм промислової частоти - струм к. з. на землю. Якщо дуга к. з. горить стійко - відбувається відключення лінії.

Тривалість струму блискавки мала (приблизно 100 мкс) в порівнянні з півперіодом напруги промислової частоти (0,01 с = 10000 мкс). Тому, значну роль відіграє фаза робочої напруги в момент удару блискавки. При малому миттєвому значенні робочої напруги та достатньо великому шляху імпульсного перекриття не створюються умови для *стійкого горіння дуги* промислової частоти.

В інженерних розрахунках прийнято оцінювати ймовірність переходу імпульсного перекриття в стійку дугу P_{cd} по середній напруженості електричного поля вздовж шляху перекриття l_{np} при найбільшій робочій нарузі $E_{cp} = U_{MPOB} / l_{np}$. Для довгих повітряних проміжків та ліній на **дерев'яних опорах** ймовірність виникнення стійкої дуги P_{cd} визначається з виразу:

$$P_{cd} = (1,6 \cdot E_{cp} - 6) \cdot 10^{-2}, \quad (3.34)$$

де E_{cp} - середня напруженість електричного поля (діюче значення), $kB \cdot m^{-1}$.

Так як ймовірність P_{cd} визначає часту всіх перекриттів ізоляції, які привели до відключення лінії, загальне число *грозових відключень лінії за рік* рівне із врахуванням (3.33):

$$N_{відкл} = n_{np} \cdot P_{cd} = N_{уд} \cdot P_{np} \cdot P_{cd} = 0,4 \cdot D_G \cdot h_{cp} \cdot L \cdot P_{np} \cdot P_{cd} \cdot 10^{-3}. \quad (3.35)$$

Для порівняння грозоопірності різних ЛЕП використовується т. з. *питоме число відключень лінії* $n_{відкл}$, тобто число відключень лінії довжиною $L = 100$ км, яка пролягає у районі з кількістю грозових годин в році $D_G = 30$:

$$n_{відкл} = 0,4 \cdot 30 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3} \cdot h_{cp} \cdot P_{np} \cdot P_{cd} = 1,2 \cdot h_{cp} \cdot P_{np} \cdot P_{cd}. \quad (3.36)$$

Для ліній на **металічних опорах** при номінальних напругах до 220 кВ приймають $P_{cd} = 0,7$, а для ліній 330 кВ та вище - $P_{cd} = 1,0$.

Можливі два шляхи зменшення числа грозових відключень лінії:

- зменшення *ймовірності перекриття*;
- зменшення *ймовірності переходу імпульсного перекриття у стійку дугу короткого замикання*.

Перший метод реалізується підвіскою тросових блискавковідводів та створенням малого імпульсного опору заземлення опор. При цьому, з одного боку, різко знижується ймовірність безпосереднього ураження блискавкою фазних проводів, а, з іншого боку, знижується імпульсна напруга на ізоляції при ударах в опори та троси.

Другий метод здійснюється шляхом подовження шляху перекриття, що знижує середню робочу напруженість електричного поля, або за допомогою дугозахисних реакторів у мережах 6-35 кВ, що дає значне збільшення ймовірності самостійного згасання дуги замикання на землю.

3.6.2 Грозоопірність ліній без тросів.

При прямому ударі блискавки у провід струм блискавки розтікається вздовж ураженого проводу в обидва боки. Тому, амплітуда хвилі перенапруги на проводі визначається з формули:

$$U_{\max} = \frac{I_{\delta} \cdot Z_{np}}{2}, \quad (3.37)$$

де Z_{np} - хвильовий опір проводу (наближено 300 Ом).

При наявності корони на проводі збільшується його ємність і, відповідно, зменшується його хвильовий опір.

На ЛЕП з **металічними опорами** імпульс перенапруги з амплітудою U_{\max} діє на ізоляцію проводу на траверсі опори. При струмах блискавки порядку $I_{\delta} = (5 \dots 10) \text{ кА}$, тобто у більшості випадків грозових розрядів у лінію, створюються перенапруги порядку $U_{\max} = (1,0 \dots 1,5) \text{ МВ}$, достатні для перекриття гірлянди ізоляторів.

На ЛЕП з **дерев'яними опорами** (6-35 кВ) перекриття відбувається між проводами вздовж шляху: гірлянда–дерев'яна траверса–гірлянда. Імпульс блискавки на ураженому проводі індукуює напругу на сусідньому проводі у відповідності з коефіцієнтом електромагнітного зв'язку $k_{ел}$.

Між проводами виникає перенапруга, яку можна оцінити з виразу:

$$U_{\max} = \frac{I_{\delta} \cdot Z_{np}}{2} \cdot (1 - k_{ел}), \quad (3.38)$$

де $k_{ел} = 0,25 \dots 0,40$ - коефіцієнт зв'язку між проводами з урахуванням імпульсної корони.

Ймовірність перекриття лінійної ізоляції P_{np} розраховується у відповідності з критичним значенням струму блискавки $I_{\delta_{кр}}$ ($P_{I_{\delta}} = \exp(-0,04 \cdot I_{\delta_{кр}})$), який, у свою чергу, визначається з умов *рівності* діючої на ЛЕП перенапруги U_{\max} та імпульсної 50%-ї розрядної напруги ізоляції $U_{50\%}$ (характеристика ізоляції лінії), згідно таких виразів:

- для ЛЕП на **металічних та залізобетонних опорах**:

$$I_{\delta_{кр}} = \frac{2 \cdot U_{50\%}}{Z_{np}}; \quad (3.39)$$

- для ЛЕП на **дерев'яних опорах**:

$$I_{\delta_{кр}} = \frac{2 \cdot U_{50\%}}{Z_{np} \cdot (1 - k_{ел})}. \quad (3.40)$$

Мале число відключень ліній на **дерев'яних опорах без тросів** забезпечується за рахунок малої ймовірності $P_{сд}$ переходу імпульсного перекриття у стійку дугу. Очевидно, що у випадку **металічних опор** розрядний проміжок зменшується до довжини однієї гірлянди, що викликає істотне збільшення як коефіцієнта $P_{сд}$, так і ймовірності перекриття ізоляції P_{np} . Тому, лінії 110 кВ і вище на металічних опорах в районах з середньою і значною інтенсивністю грозової діяльності захищають тросовими блискавковідводами вздовж всієї довжини.

У лініях електропередачі 6–35 кВ на **металічних опорах**, які працюють в системі з ізольованою нейтраллю та під'єднаними *дугозахисними апаратами*, однофазні перекриття ізоляції не викликають відключення лінії, т. я. дуга

ємнісного струму гаситься дугогасною катушкою, а коефіцієнт переходу у силову дугу $P_{сд} \approx 0$ незалежно від значення $E_{ср}$. Тому відключення таких ліній внаслідок грозових уражень можуть відбуватись лише у випадках дво- чи трифазного перекриття.

При ураженні одного з проводів лінії після перекриття ізоляції у шлях струму блискавки замість хвильового опору проводу включається значно менший імпульсний опір заземлення опори R_i . Якщо розряд блискавки відбувся у провід неподалік опори, через заземлювач пройде практично повний струм блискавки I_{δ} і опора набуде потенціал, приблизно рівний $U_{он} = I_{\delta} \cdot R_i$. На сусідньому проводі наводиться потенціал $U_{пров} = I_{\delta} \cdot R_i \cdot k_{ел}$. Перекриття ізоляції цього проводу відбудеться, якщо

$$I_{\delta \text{ кр}} \geq \frac{U_{50\%}}{R_i \cdot (1 - k_{ел})}. \quad (3.41)$$

Звідси витікає, що ймовірність перекриття ізоляції другого проводу $P_{пр}$ тим менша, ніж менший опір заземлення опори R_i . Тому на лініях 6–35 кВ на **металічних опорах без тросів** доцільно застосовувати додаткові заземлювачі для зменшення опору заземлених опор.

Удар блискавки поблизу ЛЕП також зумовлює перенапруги у проводах - індуквані перенапруги (див. рис. 3.12).

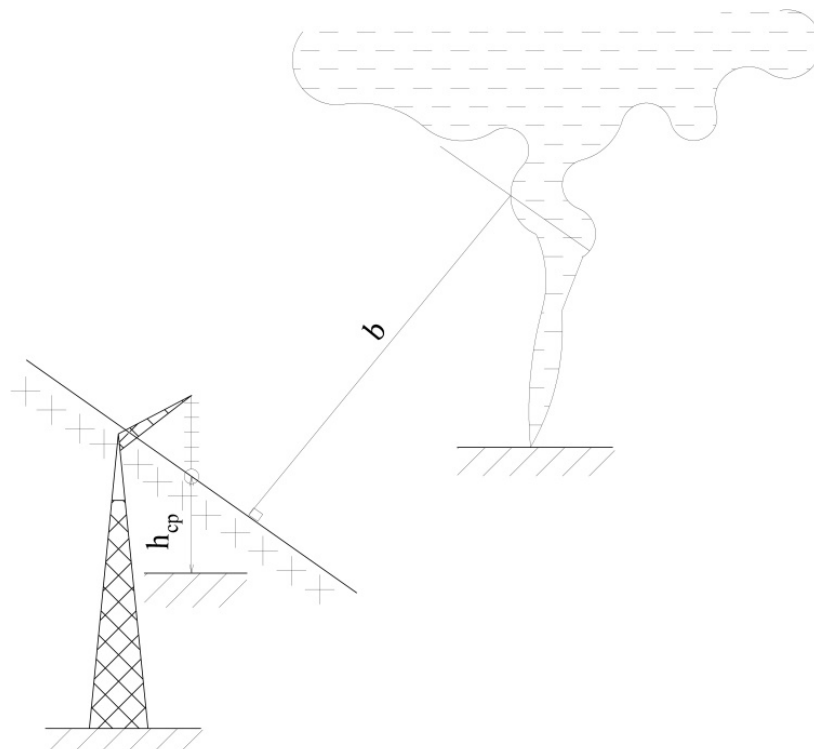


Рис. 3.12 - До пояснення явища виникнення перенапруги на проводах ЛЕП

Індуквані перенапруги на фазних проводах мають електричну і магнітну складову:

$$U_{инд} = U_{инд е} + U_{инд м}. \quad (3.42)$$

Заряди *лідерного каналу* блискавки зв'язують на проводі заряди протилежного знаку. Електричне поле зв'язаних зарядів урівноважується полем лідера блискавки - потенціал проводу протягом лідерної стадії рівний нулю (робоча напруга не враховується). Під час *головного розряду* заряди лідера нейтралізуються; при цьому зв'язані на проводі заряди звільняються від впливу блискавки, що супроводжується підвищенням потенціалу проводу і утворенням імпульсів напруги, які розповсюджуються вздовж проводу в обидва боки. Так виникає *електрична складова індукованої напруги*. Значення її прямо пропорційне лінійній густині зарядів σ_σ *лідерного каналу* й середній висоті підвісу проводу h_{cp} і обернено пропорційне найменшій відстані b від проводу до місця удару блискавки (див. рис. 3.12).

Якщо хвиля нейтралізації *від'ємного* заряду блискавки *позитивним* зарядом із землі рухається вгору із швидкістю v , то амплітуда струму блискавки визначиться з виразу:

$$I_\sigma = \sigma_\sigma \cdot v. \quad (3.43)$$

Тоді для *електричної складової індукованої напруги* можна записати:

$$U_{\text{інд } e} = k_e \cdot \frac{h_{cp}}{b} \cdot I_\sigma, \quad (3.44)$$

де k_e - коефіцієнт пропорційності, який обернено пропорційно враховує зміну швидкості головного розряду, *Ом*.

Зміна *магнітного поля* при головному розряді зумовлює виникнення *магнітної складової індукованої напруги* у петлі: опора-гірлянда ізоляторів-провід-земля. Максимальне значення цієї складової має аналогічну залежність від h_{cp} , b , I_σ :

$$U_{\text{інд } m} = k_m \cdot \frac{h_{cp}}{b} \cdot I_\sigma, \quad (3.45)$$

де k_m - коефіцієнт, який зростає із збільшенням швидкості головного розряду, *Ом*.

Оскільки коефіцієнти k_e та k_m по-різному залежать від швидкості головного розряду, їх суму наближено можна прийняти рівною $k_e + k_m = \text{const} \approx 30 [\text{Ом}]$.

Тоді, максимальне значення індукованої напруги при ударі блискавки поблизу **ЛЕП без тросів** рівне:

$$U_{\text{інд}} = (k_e + k_m) \cdot \frac{h_{cp}}{b} \cdot I_\sigma \approx 30 \cdot \frac{h_{cp}}{b} \cdot I_\sigma. \quad (3.46)$$

На рис. 3.13 подано інтегральну криву амплітуд індукованих перенапруг при ударі блискавки в землю поруч з ЛЕП, яка має середню висоту підвісу проводів $h_{cp} = 10 \text{ м}$.

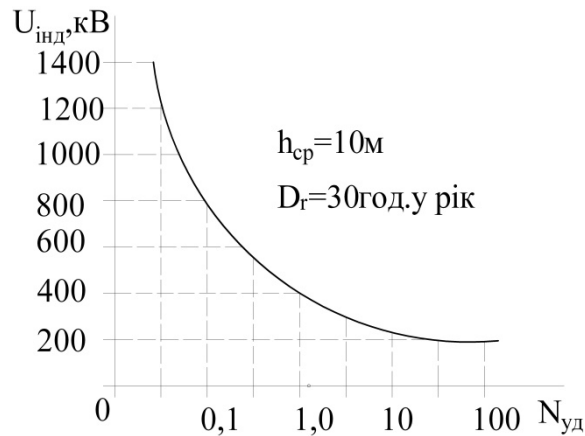


Рис. 3.13 - Інтегральна крива індукованих на ЛЕП перенапруг при ударах блискавки в землю

Як видно з графіка, індуковані перенапруги можуть перевищувати імпульсну міцність ізоляції ліній електропередачі 35 кВ ($U_{50\%} = 350 кВ$) менше 2-х разів у рік, а ліній 110 кВ ($U_{50\%} = 700 кВ$) - всього 1 раз за 5 років. Тому, такого роду індуковані перенапруги не відіграють суттєвої ролі для ЛЕП 110 кВ та вище.

3.6.3 Грозоопірність ліній з тросами.

Грозові відключення повітряних ліній з тросами можуть відбуватись з таких причин:

- удар блискавки у трос посередині прогону між опорами та перекриття повітряного проміжку: трос-провід;
- прорив блискавки через тросовий захист, тобто ураження проводу;
- удар блискавки в опору і зворотнє перекриття ізоляції з опори на провід.

3.6.3.1 Удар блискавки в трос посередині прогону між двома опорами.

Якщо вважати, що трос добре заземлений на опорах, тобто $R_i \ll Z_{mp}$, де Z_{mp} - хвильовий опір троса, та прийняти при розрахунках форму імпульсу блискавки косокутною, можна побудувати імпульс напруги у точці ураження тросу блискавкою.

По місцю удару в канал струму блискавки вмикається опір Z_k каналу, рівний половині хвильового опору тросу (паралельне з'єднання хвильових опорів справа та зліва від місця удару) як показано на рис. 3.14 а) та б).

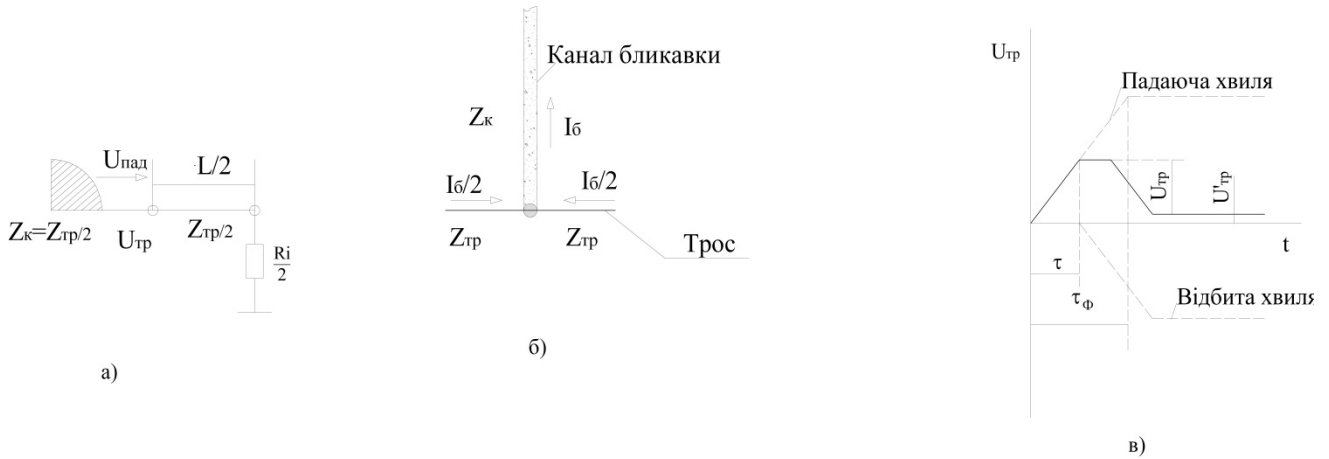


Рис. 3.14 - Удар блискавки посередині прогону ЛЕП:

- а) схема падаючої хвилі;
 б) розподіл струму блискавки;
 в) імпульс напруги на тросі

До моменту прибуття імпульсів, відбитих від опорів заземлення сусідніх опор, напруга *падаючої хвилі* $U_{над}$ на тросі визначається згідно виразу:

$$u_{над}(t) = i_b(t) \cdot \frac{Z_{mp}}{2} = a \cdot t \cdot \frac{Z_{mp}}{2}, \quad (3.47)$$

де a - крутість фронту падаючої хвилі.

Через інтервал часу $\tau = 2 \cdot \frac{l}{v_{mp}} \cdot \frac{1}{2}$, де l - довжина прогону; v_{mp} - швидкість

руху хвилі вздовж тросу, до місця удару одночасно прийдуть імпульси, відбиті зі зміною полярності від опорів заземлення двох опор. При цьому ріст напруги припиниться. Підставивши у (3.47) момент часу $t = \tau = \frac{l}{v_{mp}}$, одержимо

максимальну напругу на тросі:

$$U_{mp\max} = a \cdot \frac{l}{v_{mp}} \cdot \frac{Z_{mp}}{2}, \quad (3.48)$$

яка залежить від крутості фронту струму блискавки і не залежить від її амплітуди.

Ця напруга утримується на тросі у межах фронту хвилі; при $t \geq \tau_\phi$, вона падає до величини спаду напруги $U_{mp}^l = U_s$ на опорі заземлення опор.

Слід відзначити, що подібна форма імпульсу, а також залежність максимального значення імпульсу від крутості фронту падаючої хвилі, характерна для схем із значними індуктивностями, т. я. $R_i \ll Z_{mp}$.

Напруга між тросом і проводом, із врахуванням індукованої на проводі напруги ($k_{ел} = 0,25 \dots 0,40$), рівна:

$$U_{mp-пр} = (1 - k_{ел}) \cdot a \cdot \frac{l}{v_{mp}} \cdot \frac{Z_{mp}}{2}. \quad (3.49)$$

В рівнянні (3.49) не врахована *робоча напруга* на проводі, т. я. вона набагато менша напруги прямого удару блискавки.

Умова пробою повітряної ізоляції у прогоні між опорами може бути записана у вигляді:

$$E_{p\text{cp}} \cdot S = U_{mp-np}, \quad (3.50)$$

де $E_{p\text{cp}} = 750 \text{ кВ} \cdot \text{м}^{-1}$ - середня розрядна напруженість електричного поля;

S - довжина повітряного проміжку між тросом та проводом.

Прийнявши $Z_{mp} \approx 400 \text{ Ом}$, $k_{el} = 0,25 \dots 0,40$, $v_{mp} = 300 \text{ м} \cdot \text{мкс}^{-1}$, можна оцінити крутість фронту струму блискавки, при якій відбувається пробій повітряної ізоляції:

$$a = \frac{E_{p\text{cp}} \cdot S \cdot v_{mp}}{(1 - k_{el}) \cdot l \cdot \frac{Z_{mp}}{2}}; \quad a = \frac{750 \cdot 300}{(0,75 \dots 0,60) \cdot 200} \cdot \frac{S}{l} = (1500 \dots 1875) \cdot \frac{S}{l}. \quad (3.51)$$

Відстань між тросом і проводом *посередині прогону*, як правило, приблизно рівна 0,02 від довжини прогону.

Тоді $a = (30 \dots 37,5) \text{ кА} \cdot \text{мкс}^{-1}$, а відповідна ймовірність $P_a = \exp\left(-\frac{a}{15,7}\right)$;

$P_a = 0,09 \dots 0,15$.

Досвід експлуатації ЛЕП показує, що ймовірність пробою між тросом і проводом дуже мала, якщо відстань трос-провід по вертикалі складає не менше 2% від довжини прогону, наприклад, 8 м при довжині прогону 400 м.

3.6.3.2 Удар блискавки у вершину опори.

Частку ударів блискавки в опори (в трос поблизу опори) оцінюють виразом $4 \cdot \frac{h_{on}}{l}$, де h_{on} - висота опори; l - довжина прогону. Тоді *число ударів у опори* визначиться таким виразом:

$$n_{on} = n_{yd} \cdot 4 \cdot \frac{h_{on}}{l}, \quad (3.52)$$

де n_{yd} - число ударів блискавки у лінію електропередачі.

Зворотне перекриття лінійної ізоляції з опори на провід фази може відбутися, якщо напруга на ізоляції досягне або перевищить її імпульсну розрядну напругу.

Напруга на ізоляції рівна різниці потенціалів на опорі та на проводі. При ударі блискавки в опору майже весь струм блискавки спочатку проходить через тіло опори та її заземлення (див. позначення i_{on} на рисунку 3.15 а)).

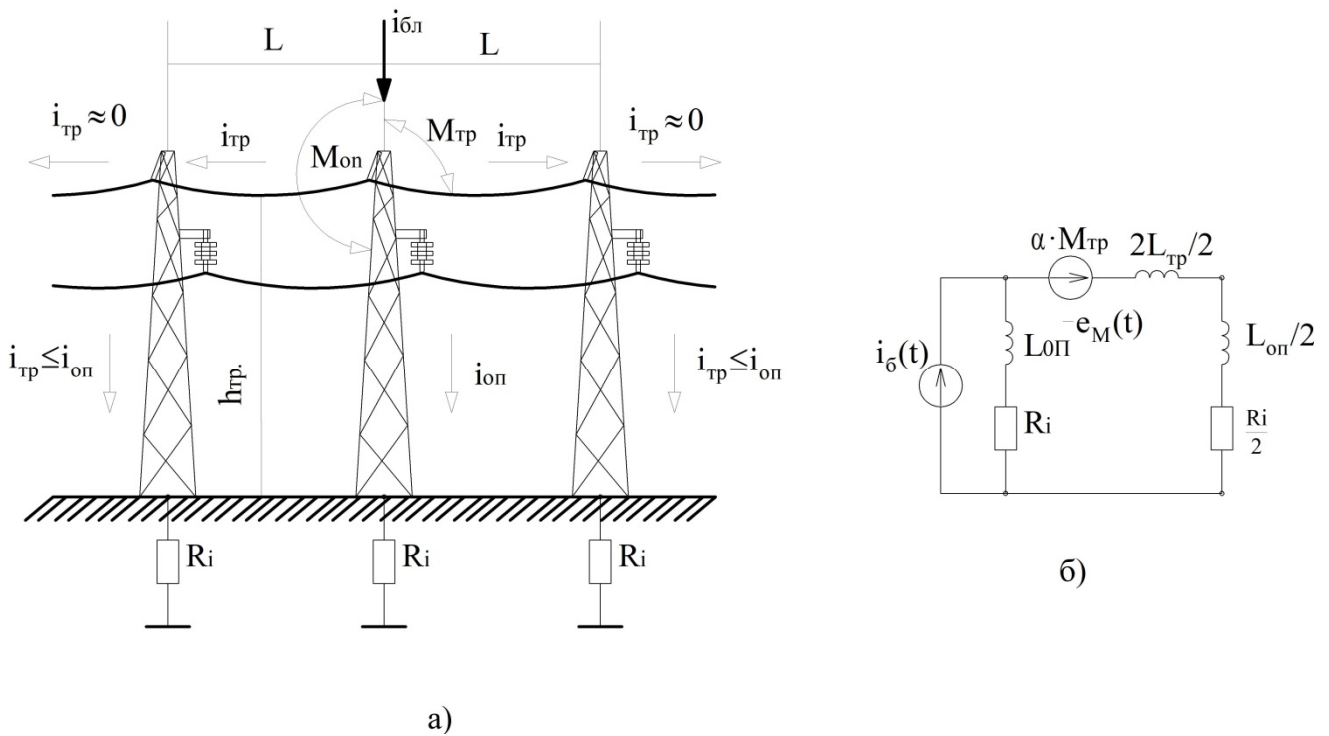


Рис. 3.15 - Удар блискавки в опору ЛЕП з тросами:

- а) - розподіл струмів;
 б) - схема заміщення для розрахунку напруги на вершині опори

Тривалість проходження імпульсу по опорі, як правило, на порядок менша від тривалості фронту струму блискавки. Тому, опорі в схемі заміщення (див. рис. 3.15 б)) можна представити концентрованою індуктивністю $L_{on} = L_0 \cdot h_{on}$ та імпульсним опором заземлення R_i , де L_0 - питома індуктивність опори висотою h_{on} .

Одно- та двостоякові металічні й залізобетонні опори мають питомі індуктивності $0,6 \text{ мкГн} \cdot \text{м}^{-1}$ та $0,5 \text{ мкГн} \cdot \text{м}^{-1}$, відповідно; дерев'яні опори з двома заземлюючими спусками - $0,7 \text{ мкГн} \cdot \text{м}^{-1}$.

З часом дві сусідні опори беруть все більшу участь у відводі струму блискавки у землю, що зумовлює зменшення потенціалу ураженої опори. Для реальних значень тривалості фронту струму блискавки ($\tau_\phi = 10 \cdot \frac{l}{c}$; $\tau_\phi \approx 20 \text{ мкс}$, де $c = 300000 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} = 300 \text{ м} \cdot \text{мкс}^{-1}$ - швидкість світла) та імпульсних опорів заземлення опор $R_i \leq 20 \text{ Ом}$ достатня точність розрахунків забезпечується при врахуванні відбиття імпульсів тільки від опор, які розташовані найближче до ураженої опори. В цьому випадку у схемі рис. 3.15 б) прогони лінії справа та зліва заміщаються послідовною ланкою $L_{mp} / 2$; $L_{on} / 2$; $R_i / 2$.

Потенціал ураженої опори визначається спадом напруги на опорі заземлення та індуктивності опори, а також складовою, зумовленою індуктивним зв'язком між магнітним полем каналу блискавки з струмом $i_6(t)$ та

магнітним полем навколо тіла опори. Коефіцієнт взаємодії індукції $M_{on} \approx M_0 \cdot h_{on}$, де питомий коефіцієнт індуктивного зв'язку з опором $M_0 \approx 0,2 \text{ мкГн} \cdot \text{м}^{-1}$. Таким чином, потенціал вершини опори:

$$U_{on} = i_{on}(t) \cdot R_i + L_{on} \cdot \frac{di_{on}(t)}{dt} + M_{on} \cdot \frac{di_o(t)}{dt}. \quad (3.53)$$

Друга та третя складові мають вагу тільки у межах фронту струму блискавки. Струм в опорі визначається із схеми заміщення (див. рис 3.11 б), в якій є джерело струму $i_o(t) = a \cdot t$, де a - крутість фронту блискавки, та джерело напруги $e_m(t) = a \cdot M_{mp}$, яке враховує е. р. с., наведену в петлі: трос–земля магнітним полем каналу блискавки; $M_{mp} \approx 0,5 \cdot h_{mp}$, де h_{mp} - середня висота підвісу тросу.

Струм в опорі в межах фронту блискавки визначається з виразу:

$$i_{on}(t) = a \cdot t \cdot \frac{0,5 \cdot L_{mp} - M_{mp}}{0,5 \cdot L_{mp} + L_{on}} \cdot \frac{1 - \exp(-\alpha \cdot t)}{\alpha \cdot t}, \quad (3.54)$$

де $\alpha = \frac{R_i}{0,5 \cdot L_{mp} + L_{on}}$; $L_{mp} = Z_{mp} \cdot \frac{l}{v_{mp}} = 0,18 \cdot l \cdot \ln \frac{2 \cdot h_{mp}}{r_{mp}}$.

Похідна по часу струму в опорі:

$$\frac{di_{on}(t)}{dt} = a \cdot \frac{0,5 \cdot L_{mp} - M_{mp}}{0,5 \cdot L_{mp} + L_{on}} \cdot \exp(-\alpha \cdot t). \quad (3.55)$$

Для визначення напруги на лінійній ізоляції необхідно знати, окрім величини потенціалу ураженої опори U_{on} , також величину потенціалу проводу U_{np} в моменту максимуму струму блискавки.

Потенціал проводу має три складові:

- робочу напругу $U_{роб}$;
- напругу, індуквану на проводі зарядом лідера блискавки $U_{інд\ лід}$ (електростатична складова індукованих перенапруг);
- напругу, індуквану на проводі в результаті розповсюдження вздовж тросу імпульсів напруги з амплітудою $U_{on} - U_{інд\ тр}$.

Вплив *робочої напруги* враховується виходячи з того, що принаймні на одній фазі лінії миттєве значення напруги має полярність, протилежну полярності потенціалу вершини опори, а розрахункове значення $U_{роб}$ приймається рівним середньому значенню за півперіод:

$$U_{роб} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} \approx 0,5 \cdot U_{ном}. \quad (3.56)$$

Електрична складова індукованої перенапруги при ударі блискавки в опору може бути приблизно розрахована згідно виразу:

$$U_{інд} \approx E_{cp} \cdot h_{cp} \cdot (1 - k_{el}), \quad (3.57)$$

де $E_{cp} \approx 10 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$ - середня напруженість електричного кола в проміжку між каналом лідера блискавки та опором перед моментом головного

розряду;

$k_{ел}$ - коефіцієнт електромагнітного зв'язку між проводом та тросом, який враховує екрануючу дію тросу (див. (3.38)).

Напруга $U_{інд}$ має полярність, обернену полярності потенціалу вершини опори.

Проходження струму вздовж тросу зумовлює появу на проводі напруги $k_{ел} \cdot U_{он}$ того ж знаку, що й потенціал опори. Ця складова зменшує напругу на ізоляції лінії.

Таким чином, напруга на лінійній ізоляції $U_{ізол}$, рівна різниці потенціалів вершини опори та проводу, в момент максимуму струму блискавки визначиться з виразу:

$$\begin{aligned} U_{ізол} &= U_{он} - U_{пр} = U_{он} - (-U_{роб} - U_{інд} + k_{ел} \cdot U_{он}) = \\ &= U_{он} \cdot (1 - k_{ел}) + U_{роб} + U_{інд}. \end{aligned} \quad (3.58)$$

Цю напругу слід порівняти з напругою на перекриття гірлянди ізолятора при передрозрядному часі, рівному тривалості фронту імпульсу струму блискавки τ_{ϕ} .

Значення $U_{ізол}$ залежить від крутості a фронту струму блискавки, яка при заданому часі τ_{ϕ} визначає максимальне значення струму блискавки $I_{\sigma} = a \cdot \tau_{\phi}$.

Якщо побудувати залежності напруги на ізоляції від часу $U_{ізол}(t)$ при різних крутостях фронту a (див. рис. 3.16), точки перетину цих кривих з вольт-секундною характеристикою ізоляції визначають тривалість фронту струму блискавки $\tau_{\phi} = t_p$ та мінімальне значення амплітуди струму блискавки $I_{\sigma} = a \cdot \tau_{\phi} = a \cdot t_p$, при якому відбудеться перекриття ізоляції.

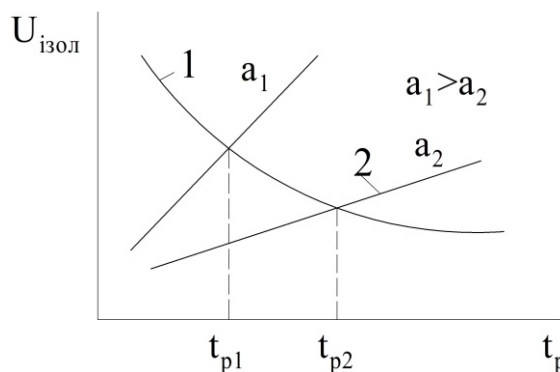


Рис. 3.16 - Графік визначення тривалості розряду лінійної ізоляції:

- 1 - вольт-секундна характеристика ізоляції;
- 2 - напруга на ізоляції

При цьому, для кожної крутості фронту отримуємо певне значення струму блискавки I_{σ} .

Отримані дані дають можливість побудувати т. з. криву небезпечних параметрів (див. рис. 3.17). Ця крива обмежує область D сукупних значень крутості фронту та струму блискавки, при яких відбувається перекриття лінійної ізоляції. Наприклад, для крутості a_1 перекриття ізоляції відбувається при

струмах більших за $I_{\sigma 1}$ і т. д.

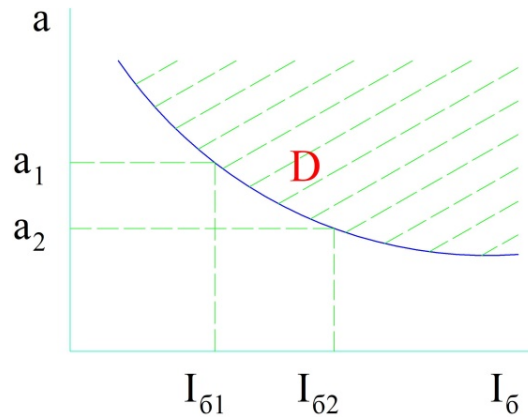


Рис. 3.17 - Крива небезпечних параметрів

Базуючись на *кривій небезпечних параметрів* будують *криву ймовірності небезпечних параметрів* (див. рис. 3.18).

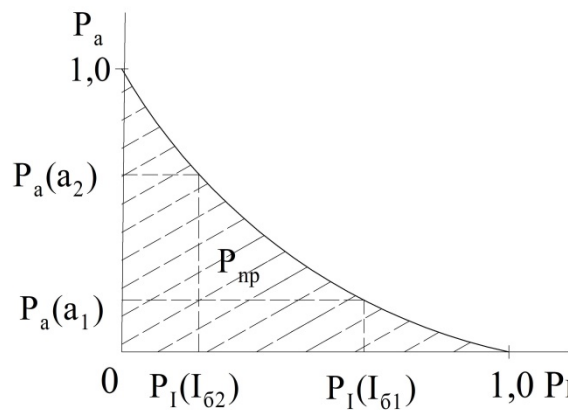


Рис. 3.18 - Графік визначення ймовірності перекриття ізоляції

Ймовірність перекриття ізоляції визначається з виразу:

$$P_{np} = \iint_D f(I_{\sigma}, a) dI_{\sigma} da, \quad (3.59)$$

де $f(I_{\sigma}, a)$ - двовимірна функція густини ймовірності максимального значення та крутості фронту струму блискавки, а інтегрування відбувається в області D визначення параметрів a та I_{σ} .

При практичних розрахунках, в якості першого наближення, максимальні значення струму I_{σ} та крутості фронту блискавки a приймаються незалежними випадковими величинами, ймовірності яких визначаються згідно (3.2) й (3.3):

$$P_I(I_{\sigma}) = \exp(-0,04 \cdot I_{\sigma}); \quad P_a(a) = \exp(-0,08 \cdot a).$$

Тоді вираз (3.59) приймає вигляд:

$$\begin{aligned} P_{np} &= \iint_D f_1(I_{\sigma}) f_2(a) dI_{\sigma} da = \int_0^{\infty} f_1(I_{\sigma}) dI_{\sigma} \cdot \int_0^{\infty} f_2(a) da = \\ &= \int_0^1 dP_I \cdot \int_0^1 dP_a = \int_0^1 P_I dP_a = \int_0^1 P_a dP_I, \end{aligned} \quad (3.60)$$

тобто ймовірність перекриття визначається заштрихованою площею на рис. 3.18, яка обмежена кривою ймовірності небезпечних параметрів.

Спрощено ймовірність перекриття ізоляції при ударі блискавки в опору можна визначити за допомогою значення критичного струму блискавки $I_{кр}$, який визначається з умови рівності діючої напруги $U_{ізол}$ та імпульсної розрядної напруги ізоляції $U_{50\%}$ згідно такого виразу:

$$I_{кр} = \frac{U_{50\%}}{R_i + \delta \cdot h_{on}}, \quad (3.61)$$

де $\delta = 0,15$ для ліній електропередачі з двома тросами та $\delta = 0,3$ для ліній з одним тросом.

Очевидно, що при наявності двох тросів частка струму в опорі менша, ніж при одному тросі, і критичне значення струму блискавки вище. На противагу цьому, збільшення висоти опори, а отже, і її індуктивності зумовлює ріст напруги на гірлянді ізоляторів і, як наслідок, зменшення критичного струму блискавки.

3.6.4 Питоме число відключень ліній з тросами.

Питоме число відключень ЛЕП з тросами $n_{відкл}$ обчислюються згідно такого виразу:

$$n_{відкл} = 4h_{mp} \left\{ P_\alpha \cdot P_{np} \cdot P_{cd1} + (1 - P_\alpha) \cdot \left[\frac{4h_{on}}{l} \cdot P_{on} \cdot \eta_1 + \left(1 - \frac{4h_{on}}{l} \right) \cdot P_{mp} \cdot P_{cd2} \right] \right\}, \quad (3.62)$$

де h_{mp} - середня висота підвісу тросів на опорах;

h_{on} - висота опори;

P_α - ймовірність ураження проводу, тобто прориву блискавки через тросовий захист (див. (3.17));

P_{np} - ймовірність перекриття ізоляції на опорі при ударі блискавки у провід (критичний струм блискавки $I_{кр}$ визначається з формул (30.39) й (30.40));

P_{on} - ймовірність перекриття ізоляції при ударі в опору ($I_{кр}$ визначається з (3.61));

P_{mp} - ймовірність пробою проміжку «трос–провід» при ударі в трос посередині прогону (використовуються вирази (3.49) та (3.3) для ймовірності певного значення крутості фронту $P(a)$);

P_{cd1} - ймовірність утворення стійкої дуги при перекритті ізоляції опори;

P_{cd2} - те ж при пробі повітряної ізоляції у прогоні.

На рисунку 3.19 наведені залежності питомого числа відключень $n_{відкл}$ від імпульсного опору R_i заземлення опор для двох типів ЛЕП 220 кВ.

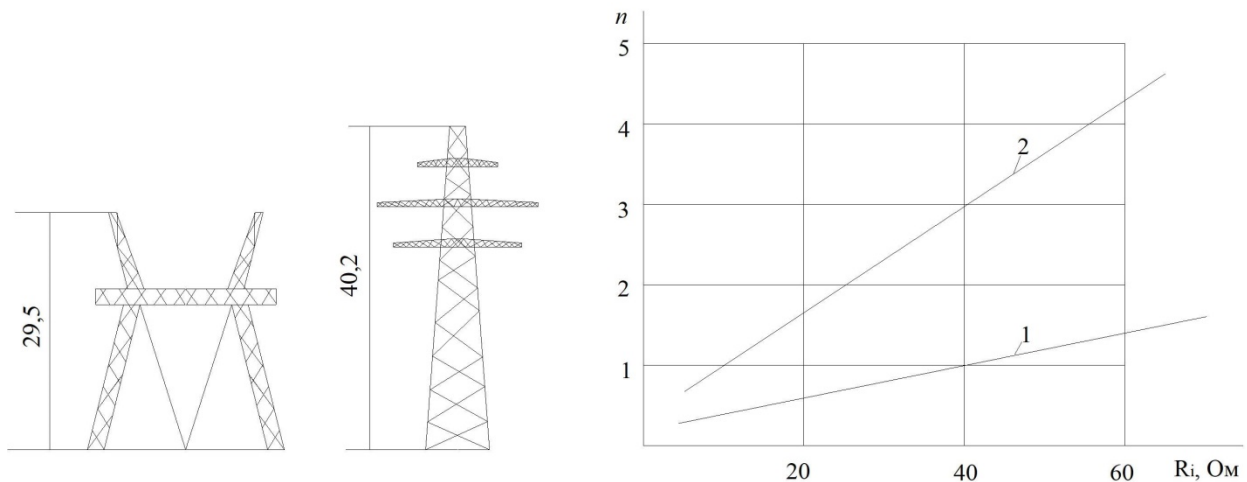


Рис. 3.19 - Графік питомого числа відключень одноланкових (1) й дволанкових (2) ЛЕП 220 кВ

Лінії електропередачі з дволанковим розміщенням фазних проводів, які мають опори значної висоти, як видно з графіка на рис. 3.19 (пряма 2), відключаються значно частіше, ніж одноланкові лінії з горизонтальним розміщенням проводів (пряма 1).

Для досягнення прийнятних показників грозоопірності ліній електропередачі на ґрунтах з різними питомими опорами нормуються такі значення опору заземлення опор при промисловій частоті струму:

Таблиця 3.3 - Опір заземлення опор для різних ґрунтів

$\rho, \text{Ом} \cdot \text{м}$	до 100	100–500	500–1000	більше 1000
$R, \text{Ом}$	до 10	до 15	до 20	до 30

В імпульсному режимі опори зконцентрованих заземлювачів будуть дещо меншими через іскровий ефект. У гірських районах (скельні ґрунти) опори заземлення можуть бути більш високими, ніж наведені вище, але завдяки зменшенню струмів блискавок у порівнянні з рівнинною місцевістю число відключень ЛЕП зменшиться до прийнятного значення.

Підсумок

Грозові перенапруги на лініях електропередачі виникають як під час безпосередніх уражень ліній грозовими розрядами (перенапруги прямого удару блискавкою) так і при розрядах блискавки в землю поблизу лінії (індуковані перенапруги).

Як відомо, удар блискавки в об'єкт може відбутися, якщо головка лідерного каналу на висоті орієнтування знаходиться в межах деякої відстані від об'єкту (для ЛЕП - трикратна її висота).

Ураження блискавкою фазного проводу ЛЕП, яке супроводжується проходженням великого струму, створює на проводі таку високу імпульсну

напругу, що практично неможливо створити ізоляцію, яка могла б її витримати.

Наявність тросів не виключає можливості появи високих потенціалів на вершині металічної опори при прямих ударах в неї блискавки навіть при малих імпульсних опорах заземленої опори. Високий потенціал на опорі може стати причиною розряду з опори на фазний провід (зворотне перекриття).

Наявність тросів не виключає, хоча з малою ймовірністю, удару блискавки у фазний провід.

При малому миттєвому значенні робочої напруги та достатньо великому шляху імпульсного перекриття не створюються умови для стійкого горіння дуги промислової частоти.

Можливі два шляхи зменшення числа грозових відключень лінії: зменшенням ймовірності перекриття або зменшенням ймовірності переходу імпульсного перекриття у стійку дугу короткого замикання.

На ЛЕП з металічними опорами імпульс перенапруги діє на ізоляцію проводу на траверсі опори. При цьому створюються перенапруги порядку $(1,0 \dots 1,5) MB$, достатні для перекриття гірлянди ізоляторів.

На ЛЕП з дерев'яними опорами (6-35 кВ) перекриття відбувається між проводами вздовж шляху: гірлянда–дерев'яна траверса–гірлянда.

У лініях електропередачі 6–35 кВ на металічних опорах, які працюють в системі з ізолюваною нейтраллю та під'єднаними дугозахисними апаратами, однофазні перекриття ізоляції не викликають відключення лінії.

Грозові відключення повітряних ліній з тросами можуть відбуватись з таких причин: удар блискавки у трос посередині прогону між опорами та перекриття повітряного проміжку: трос–провід; прорив блискавки через тросовий захист, тобто ураження проводу; удар блискавки в опору і зворотне перекриття ізоляції з опори на провід.

Крива небезпечних параметрів обмежує область сукупних значень крутості фронту та струму блискавки, при яких відбувається перекриття лінійної ізоляції.

Лінії електропередачі з двофазним розміщенням фазних проводів, які мають опори значної висоти, відключаються значно частіше, ніж однофазні лінії з горизонтальним розміщенням проводів.

Для досягнення прийнятних показників грозоопірності ліній електропередачі на ґрунтах з різними питомими опорами нормуються значення опору заземлення опор при промисловій частоті струму

Запитання

В яких випадках виникають грозові перенапруги на лініях електропередачі?

Чому неможливо створити ізоляцію на ЛЕП звичайним способом нарощування величини ізоляційних проміжків, які б ефективно протистояли ударам блискавки?

В чому фізична суть перекриття ізоляційних проміжків на ЛЕП?

Як оцінюють можливість прямого удару блискавки у фазний провід?

Чи є достовірним твердження про абсолютну стійкість до ударів блискавки тросового захисту?

Які заходи впроваджують на лініях електропередачі для унеможливлення переходу короткочасного блискавкового розряду у стійке горіння дуги?

Які заходи впроваджують на лініях електропередачі різних номіналів напруги для зменшення числа грозових відключень ЛЕП?

Чому ЛЕП з дволанковим розміщенням фазних проводів, які мають опори значної висоти, при грозових ураженнях відключаються не так же, як одноланкові лінії з горизонтальним розміщенням проводів?

Чи впливає питомий опір ґрунту на грозоопірність ЛЕП?

Рекомендована література

Базова

1. Бржезицький В. О. Техніка і електрофізика високих напруг : навч. посібн. / В. О. Бржезицький, А. В. Ісакова, В. В. Рудаков ; за ред. В. О. Бржезицького. – Харків : НТУ «ХПІ». – Торнадо, 2005. – 930 с.
(Електронний ресурс кафедри ЕК з дисципліни «ТВН»)
2. Долгинов А. И. Техника высоких напряжений в электроэнергетике / А. И. Долгинов. – М. : Энергия, 1968. – 464 с.
(Електронний ресурс кафедри ЕК з дисципліни «ТВН»)
3. Закарюкин В. П. Техника высоких напряжений : конспект лекций / В. П. Закарюкин. – Иркутск : ИрГУПС, 2005. – 137 с.
(Електронний ресурс кафедри ЕК з дисципліни «ТВН»)
4. Колечицкий Е. С. Основы расчета заземляющих устройств : учебн. пособие / Е. С. Колечицкий. – М. : Изд-во МЭИ, 2001. – 48 с.
(Електронний ресурс кафедри ЕК з дисципліни «ТВН»)
5. Маврін О. І. Техніка та електрофізика високих напруг : конспект лекцій / О. І. Маврін, К.Б. Покровський. – Львів : Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2008. – 100 с.
(Текстовий ресурс викладача з дисципліни «ТВН»)
6. Техника высоких напряжений. Лабораторный практикум : учебн. пособие для вузов / М. Е. Иерусалимов [и др.] ; под ред. М. Е. Иерусалимова. - Киев : Вища школа, 1987. - 213 с. : ил.
(Текстовий ресурс Тернопільської обласної універсальної наукової бібліотеки)
7. Техника высоких напряжений : учебн. для вузов / Л. Ф. Дмоховская, В. П. Ларионов, Ю. С. Пинталь ; под общ. ред. Д. В. Разевига. – изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Энергия, 1976. – 488с. : ил.
(Електронний ресурс кафедри ЕК з дисципліни «ТВН»)
8. Техника высоких напряжений : учебн. пособие / И. М. Богатенков, Г. М. Иманов, В. Е. Кизеветтер ; под ред. Г. С. Кучинского. – СПб : Изд-во ПЭИПК, 1998. – 700 с. : ил.
(Електронний ресурс кафедри ЕК з дисципліни «ТВН»)

Допоміжна

9. Баби́ков М. А. Техника высоких напряжений / М. А. Баби́ков, Н. С. Комаров, А. С. Сергеев ; под ред. М. А. Баби́кова. – 3-е изд., перераб. – М. – Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 671 с. : ил.

(Текстовий ресурс викладача з дисципліни «ТВН»)

10. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Часть 3. Электромагнитное поле : учебн. для вузов / Л. А. Бессонов. – 8–е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1986. – 263 с. : ил.
(Электронний ресурс кафедри ЕК з дисципліни «ТВН»)
11. Бургсдорф В. В. Заземляющие устройства электроустановок / В. В. Бургсдорф, А. И. Яковс. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 164 с.
(Электронний ресурс кафедри ЕК з дисципліни «ТВН»)
12. Дмитриевский В. С. Расчет и конструирование электрической изоляции : учебн. пособие для вузов / В. С. Дмитриевский. - М. : Энергоиздат, 1981. - 392 с. : ил.
(Текстовий ресурс Тернопільської обласної універсальної наукової бібліотеки)
13. Половой И. Ф. Перенапряжения на электрооборудовании высокого и сверхвысокого напряжения / И. Ф. Половой, Ю. А. Михайлов, Ф. Х. Халилов. - Л. : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1975. - 255 с. : ил.
(Текстовий ресурс Тернопільської обласної універсальної наукової бібліотеки)
14. Сви П. М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения / П. М. Сви. - М. : Энергоатомиздат, 1992. - 237 с. : ил.
(Текстовий ресурс Тернопільської обласної універсальної наукової бібліотеки)
15. СО–153–34.21.122–2003. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций ; введ. 2003–06–30. – М. : Изд-во МЭИ, 2004. – 57 с.
(Электронний ресурс кафедри ЕК з дисципліни «ТВН»)
16. Нормативно-технічна документація:
 - Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения свыше 1000 В : ГОСТ 721–77 (1997). – Переизд. 1997–08. – М. : Изд-во стандартов, 1977. – 3 с.
(Электронний ресурс кафедри ЕК з дисципліни «ТВН»)
 - Электрооборудование и приемники электрической энергии. Ряд номинальных токов : ГОСТ 6827–76 (1992). – Переизд. 1992–01. – М. : Изд-во стандартов, 1976. – 4 с.
(Электронний ресурс кафедри ЕК з дисципліни «ТВН»)
 - Ряды номинальных напряжений постоянного и переменного тока : ГОСТ 23366–78 (1991). – Переизд. 1991–12. – М. : Изд-во стандартов, 1978. – 5 с.
(Электронний ресурс кафедри ЕК з дисципліни «ТВН»)
 - Электроустановки переменного тока на напряжение от 3 до 750 кВ. Длина пути утечки внешней изоляции : ГОСТ 28290–89 (1997). – Переизд. 1997–03. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 5 с.

(Электронный ресурс кафедры ЕК з дисциплини «ТВН»)

- *Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление : ГОСТ 12.1.030–81 (2001). – Переизд. 2001–06. – М. : Изд–во стандартов, 1981. – 7 с.*

(Электронный ресурс кафедры ЕК з дисциплини «ТВН»)

- *Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов : ГОСТ 12.1.038-82 (2001). – Переизд. 2001–06. – М. : Изд–во стандартов, 1982. – 7 с.*

(Электронный ресурс кафедры ЕК з дисциплини «ТВН»)

- *Разрядники вентильные переменного тока на номинальные напряжения от 3,8 до 600 кВ. Общие технические условия : ГОСТ 16357–83 (2002). – Переизд. 2002–10. – М. : Изд–во стандартов, 1983. – 28 с.*

(Электронный ресурс кафедры ЕК з дисциплини «ТВН»)