

**О.І.Акімов, Д.Л.Сушко**

## **ТЕХНІКА ВИСОКИХ НАПРУГ**

**Ізоляція та перенапруги в пристроях електропостачання і  
електричної тяги залізничного транспорту**

**НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК**

Харків 2009



УКРАЇНЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

О.І.Акімов, Д.Л.Сушко

## ТЕХНІКА ВИСОКИХ НАПРУГ

Ізоляція та перенапруги в пристроях електропостачання і  
електричної тяги залізничного транспорту

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України  
як навчальний посібник для студентів  
вищих навчальних закладів*

**Харків 2009**

УДК 621.3.048+621.316.9.015.3

Акімов О.І., Сушко Д.Л. Техніка високих напруг. Ізоляція та перенапруги в пристроях електропостачання і електричної тяги залізничного транспорту: Навч. посібник. – Харків: УкрДАЗТ, 2009. – 217 с.

**ISBN 978-966-2033-03-8**

Викладаються основи теорії електричного розряду в газах і вздовж поверхні твердих діелектриків. Достатня увага приділена ізоляторам високої напруги, сучасним методам контролю ізоляції високовольтного обладнання і вимірювань при високих напругах.

Розглянуті питання захисту пристроїв електропостачання і електричної тяги від перенапруг. Дана класифікація перенапруг, освітлені причини появи перенапруг і способи захисту від них.

Посібник розрахований на широке коло користувачів: студентів, аспірантів, інженерів, викладачів, науковців, які у своїй професійній діяльності пов'язані з електроенергетикою залізничного транспорту.

Іл. 84, табл. 18, бібліогр.: 30 назв.

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України  
як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів  
(№ 1.4/18-Г-67 від 10 січня 2009 року)*

Рецензенти:

доктор техн. наук, професор О.Г.Гриб (Харківська національна академія міського господарства),

доктор техн. наук, професор О.М. Сінчук (Кременчуцький державний політехнічний університет ім. М. Остроградського),

доктор техн. наук, професор М.Л. Лисиченко (Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. П.Василенка)

О.І.Акімов, Д.Л.Сушко

## ТЕХНІКА ВИСОКИХ НАПРУГ

Ізоляція та перенапруги в пристроях електропостачання і електричної тяги залізничного транспорту

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Відповідальний за випуск Акімов О.І.

Редактор Решетилова В.В.

---

Підписано до друку 25.09.08 р.

Формат паперу 60x84 1/16 . Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 11,75. Обл.-вид.арк. 12,0.

Замовлення № Тираж 200. Ціна

---

Видавництво УкрДАЗТу, свідоцтво ДК № 2874 від. 12.06.2007 р.  
Друкарня УкрДАЗТу,

61050, Харків - 50, пл. Фейєрбаха, 7

**УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО  
ТРАНСПОРТУ**

Механічний факультет

Кафедра «Системи електричної тяги»

Акімов О.І., Сушко Д.Л.

**ТЕХНІКА ВИСОКИХ НАПРУГ**

Ізоляція та перенапруги в пристроях електропостачання і  
електричної тяги залізничного транспорту

Харків 2009

Посібник розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри СЕТ від 12.05.2008р, протокол № 8

УДК 621.3.048+621.316.9.015.3

О.І. Акімов, Д.Л. Сушко. Техніка високих напруг. Ізоляція та перенапруги в пристроях електропостачання і електричної тяги залізничного транспорту. Харків: УкрДАЗТ, 2009.

Викладаються основи теорії електричного розряду в газах і вздовж поверхні твердих діелектриків. Достатня увага приділена ізоляторам високої напруги, сучасним методам контролю ізоляції високовольтного обладнання і вимірювань при високих напругах.

Розглянуті питання захисту пристроїв електропостачання і електричної тяги від перенапруг. Дана класифікація перенапруг, освітлені причини появи перенапруг і способи захисту від них.

Посібник розрахований на широке коло користувачів: студентів, аспірантів, інженерів, викладачів, науковців, які в своїй професійній діяльності пов'язані з електроенергетикою залізничного транспорту.

Ілюстрацій – 84, таблиць – 18, бібліографія – 30 найменувань.

### **Рецензенти:**

Гриб О.Г. – д.т.н., професор, зав. кафедри «Електропостачання міст»

Харківської національної академії міського господарства

Сінчук О.М. – д.т.н., професор, зав. кафедри «Системи електроспоживання та

енергетичного менеджменту» Кременчуцького державного

політехнічного університету ім. М. Остроградського

Лисиченко М.Л. – д.т.н., професор, зав. кафедри «Застосування електроенергії у сільському господарстві»

Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П.Василенка

## ЗМІСТ

Передмова .....	6
Розділ 1. Загальні властивості розрядів у газах .....	9
1.1. Особливості зовнішньої ізоляції .....	9
1.2. Основні форми газового розряду та іонізаційні процеси в газовому середовищі .....	12
1.3. Виникнення і розвиток розряду в газі при однорідному електричному полі. Самостійний і несамостійний розряди .....	20
1.4. Розрядна напруга в однорідному електричному полі. Закон Пашена .....	24
1.5. Високоміцні гази .....	29
Розділ 2. Імпульсна міцність повітряної ізоляції. Коронний та поверхневий розряди .....	32
2.1. Розряди при імпульсних напругах .....	32
2.2. Характеристики імпульсної міцності ізоляції .....	35
2.3. Загальна характеристика коронного розряду .....	39
2.4. Корона при постійній і змінній напругах .....	40
2.5. Особливості розвитку розряду на поверхні твердих діелектриків .....	44
Розділ 3. Ізолятори високої напруги .....	48
3.1. Характеристики ізоляторів .....	48
3.2. Лінійні ізолятори .....	51
3.3. Станційно-апаратні ізолятори .....	54
3.4. Ізолюючі елементи в контактних мережах .....	59
Розділ 4. Контроль внутрішньої ізоляції .....	64
4.1. Особливості внутрішньої ізоляції .....	64
4.2. Система контролю внутрішньої ізоляції .....	70
4.3. Випробування ізоляції підвищеною напругою .....	73
4.4. Процеси, які використовують для неруйнівних методів контролю ізоляції .....	75
4.5. Контроль ізоляції за опором або струмом провідності .....	78

4.6. Контроль ізоляції за кутом діелектричних втрат .....	80
4.7. Контроль ізоляції за ємнісними характеристиками ...	82
4.7.1. Метод "ємність – частота" .....	82
4.7.2. Метод "ємність – час" .....	83
4.7.3. Метод "ємність – температура" .....	84
4.8. Контроль ізоляції за розподілом напруги на елементах конструкції .....	85
4.9. Виявлення іонізаційних процесів в ізоляції .....	86
4.10. Хроматографічний аналіз газів у трансформаторному маслі .....	88
 Розділ 5. Вимірювання при високих напругах і випробувальні установки .....	90
5.1. Вимірювання при високих напругах .....	90
5.1.1. Електростатичні вольтметри .....	91
5.1.2. Вимірювання кульовими розрядниками .....	95
5.1.3. Вимірювання амплітуд напруг за допомогою конденсаторів і випрямлячів .....	97
5.1.4. Подільники напруги .....	99
5.2. Випробувальні установки високої напруги .....	101
5.2.1. Випробувальні трансформатори .....	101
5.2.2. Установки випрямленої напруги .....	105
5.2.3. Генератори імпульсних напруг .....	107
5.2.4. Генератори внутрішніх перенапруг .....	108
 Розділ 6. Загальна характеристика перенапруг в електричних системах. Внутрішні перенапруги .....	111
6.1. Класифікація перенапруг .....	111
6.2. Внутрішні перенапруги. Загальні відомості про них ...	113
6.3. Перенапруги при відмиканні ненавантажених ліній електропередачі .....	115
6.4. Перенапруги при відмиканні трансформаторів на холостому ході .....	121
 Розділ 7. Атмосферні перенапруги .....	124
7.1. Грози і розвиток грозового розряду .....	124
7.2. Діяння струму блискавки .....	126



7.3. Основні параметри блискавки. Інтенсивність грозової діяльності .....	128
7.4. Розрахунок індукованих перенапруг .....	131
7.5. Поширення хвиль перенапруг вздовж проводів .....	132
Розділ 8. Захист від прямих ударів блискавки .....	137
8.1. Грозозахист будинків і споруд .....	137
8.2. Розрахунок допустимої відстані між блискавковідводом та об'єктом, що захищається .....	140
8.3. Зони захисту блискавковідводів .....	142
8.3.1. Зони захисту стержневих блискавковідводів .....	142
8.3.2. Зони захисту тросових блискавковідводів .....	147
8.4. Конструктивне виконання блискавковідводів .....	149
8.5. Робочі і захисні заземлення .....	151
Розділ 9. Захист від хвиль перенапруг, що набігають з ліній .....	159
9.1. Призначення і класифікація розрядників .....	159
9.2. Трубочаті розрядники .....	162
9.3. Вентильні розрядники .....	168
9.4. Обмежувачі перенапруг .....	180
Розділ 10. Грозозахист повітряних ліній електропередачі і підстанцій .....	184
10.1. Загальні принципи грозозахисту повітряних ліній ...	184
10.2. Критерії грозостійкості повітряних ліній .....	186
10.3. Захист місць перетинів повітряних ліній .....	188
10.4. Загальні принципи грозозахисту підстанцій .....	190
10.5. Типові схеми грозозахисту підстанцій .....	193
Розділ 11. Захист від перенапруг пристроїв і устаткувань електропостачання і електричної тяги .....	201
11.1. Принцип координації ізоляції .....	201
11.2. Особливості захисту від перенапруг обладнання тягових підстанцій .....	202
11.3. Захист від перенапруг контактної мережі .....	207
11.4. Захист від перенапруг ізоляції обладнання електрорухомого складу .....	211
Бібліографічний список .....	216

## ПЕРЕДМОВА

На сучасному етапі розвитку електроенергетики дисципліна “Техніка високих напруг” є досить важливою, вона дає основу для низки інших суміжних дисциплін. Разом з тим вона має ряд особливостей, основні з яких – це порівняно велика кількість спеціальних інженерних питань, відносна складність теоретичних основ, необхідність виконання численних і громіздких розрахунків, а також тісний зв’язок з питаннями економіки.

Головна мета вивчення даного курсу – отримання достатніх уявлень про способи вирішення завдань, які виникають під час проектування й експлуатації високовольтного електрообладнання.

У такому її вигляді дисципліна неодноразово викладалась в УкрДАЗТ на кафедрі “Системи електричної тяги”.

При викладенні матеріалу автори намагалися якомога повніше відобразити взаємний зв’язок між суміжними питаннями спеціальностей електроенергетичного профілю. Це обумовлено комплексним характером діяльності фахівця, де розподіл на окремі вузькі спеціальності є суто умовним.

Автори ставили за мету дати коротке, але по можливості глибоке викладення основного змісту дисципліни “Техніка високих напруг”, потрібної для підготовки фахівців-електриків. Автори вважають доцільним залишити за посібником традиційну назву, тим більше, що вона збігається з назвою відповідної дисципліни.

Оскільки посібник в першу чергу призначений для студентів електричного профілю, то розглядається тільки необхідне для них коло питань техніки високих напруг: ізоляція установок високої напруги, грозові і внутрішні перенапруги і захист від них в системах електропостачання електрифікованих залізниць та пристроях електричної тяги.

Навчальний посібник “Техніка високих напруг” складається з двох змістових частин. Перша частина присвячена розгляду ізоляції.

Однією зі значних проблем в цій галузі є вивчення електричної міцності діелектриків. Електрична міцність і інші електрофізичні властивості твердих діелектриків вивчаються в інших дисциплінах. Але в техніці високих напруг електрична міцність діелектриків розглядається з урахуванням специфічних умов роботи ізоляції електроустановок, що виготовляється на

основі цих діелектриків при дії на них різних факторів: робочих напруг і перенапруг різної величини і тривалості, атмосферно-кліматичних умов, нагріву робочими струмами, високих температур електричної дуги, експлуатаційного забруднення та ін. Знання фізичних процесів, що відбуваються в діелектриках під час цих дій, дозволяє вибирати діелектрики для тих чи інших ізолюючих пристроїв, встановлювати найбільш раціональні конструктивні форми і розміри ізоляції, що забезпечують необхідну електричну міцність.

Спільний розгляд властивостей ізоляції і характеристик перенапруг дозволяє уточнити вимоги до електричної міцності ізоляції електроустановок, обґрунтовано вирішувати питання вибору конструкції і розмірів ізолюючих пристроїв.

Вирішення цих проблем поставило вимоги розроблення спеціальних випробних установок, а також науково обґрунтованої методики і техніки випробувань і досліджень в цій галузі.

Забезпечення експлуатаційної надійності ізоляції висунуло задачу створення приладів і розроблення методів її профілактичних випробувань, встановлення науково обґрунтованих строків їх проведення і показників якості ізоляції – розроблення системи контролю ізоляції.

Технічне переоснащення Укрзалізниці викликало до життя значне зростання її електрозабезпечення. Системи електропостачання електрифікованих залізниць мають протяжні повітряні і кабельні електричні мережі різних напруг, трансформаторні підстанції напругою до 110 і 220 кВ, автономні електростанції різних потужностей і напруг, а також різноманітне високовольтне обладнання. Елементи цих систем призначаються для роботи в складних умовах, до їх ізоляції пред'являються жорсткі вимоги щодо експлуатаційної надійності при дії різних факторів. Тому вивчення питань техніки високих напруг становиться необхідним для спеціалістів, що займаються проектуванням, монтажем та експлуатацією систем електропостачання електрифікованих залізниць і електричного транспорту.

Цей посібник не ставить завдання повного викладення всіх проблем техніки високих напруг. Матеріал в ньому дається лише в такому обсязі, щоб студенти отримали чітке уявлення про фізичні процеси, що відбуваються в ізоляції в експлуатаційних

умовах, змогли дати якісну оцінку впливу на її електричну міцність різних факторів.

Такі ж самі обмеження прийняті при викладенні другої змістової частини посібника.

Проблема перенапруг різного виду не менш важлива. До основних її питань відносяться і процеси виникнення перенапруг; параметри і характеристики цих перенапруг, за допомогою яких найбільш повно оцінюється дія їх на ізоляцію; імовірність дії перенапруг на електроустановки; специфічні умови поширення хвиль перенапруг в електричних системах і зміна їх параметрів під час цього процесу, а також спеціальні пристрої, призначені для зміни і обмеження цих параметрів. З цією проблемою тісно пов'язані питання улаштування систем заземлення. Всі ці питання актуальні і для електрифікованих залізниць.

Особлива увага в посібнику приділена питанням захисту від перенапруг пристроїв і устаткувань електропостачання і електричної тяги: контактної мережі, повітряних ліній, тягових підстанцій та електрорухомого складу.

Довідковий і табличний матеріал заснований на даних, опублікованих в літературі, список якої, наведений наприкінці посібника, виявився значним. Тому довелося зосередити увагу на викладенні найважливіших і принципових питань з кожної теми і відмовитись від надмірної деталізації матеріалу. Разом з тим автори вважають, що посібник повинен не тільки ознайомлювати тих, хто навчається, з фізичною сутністю основних явищ і процесів в електрообладнанні, але й дати майбутньому фахівцю певну суму практичних відомостей, необхідних в його діяльності.

Тому особлива увага в посібнику приділяється питанням, актуальним для фахівця.

Навчальний посібник в першу чергу призначений для студентів відповідних спеціальностей, він може бути рекомендований також фахівцям електротехнічних підрозділів залізниці, які організовують електротехнічне забезпечення на залізниці, та тим, хто експлуатує електричне обладнання дистанцій електропостачання залізниць, аспірантам, інженерам, викладачам та слухачам факультету підвищення кваліфікації академії.

Автори виражають подяку рецензентам за цінні зауваження, зроблені під час проглядання рукопису.

## Розділ 1

# ЗАГАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ РОЗРЯДІВ У ГАЗАХ

### 1.1. Особливості зовнішньої ізоляції

Ізоляція установок високої напруги поділяється на зовнішню і внутрішню. Остання розглянута у розділі 4 цього посібника.

Різні гази і, зокрема, повітря знаходять широке застосування як ізолююче середовище для багатьох високовольтних установок і апаратів.

Доцільність використання діелектричних властивостей повітря в електричних установках пояснюється меншою вартістю і порівняною простотою створення ізоляції, яку в цьому разі називають зовнішньою. До зовнішньої ізоляції установок високої напруги відносять ізоляційні проміжки між електродами (проводами ліній, шинами розподільних устаткувань тощо), у яких роль основного діелектрика виконує повітря.

Від електричної міцності повітряного проміжку залежить надійність роботи електричних пристроїв і, отже, безперебійність постачання електроенергією споживачів.

Кожний газ, захищений від зовнішнього впливу, електрично нейтральний, тобто не проводить електричного струму. Однак, у реальних умовах у будь-якому газі завжди міститься деяка кількість електронів і іонів. Причини їх появи: ультрафіолетові випромінювання сонця, космічні промені, радіоактивне випромінювання Землі.

За нормальних умов кількість іонів в одному кубічному сантиметрі повітря поблизу поверхні Землі досягає 500-1000 пар. Це невелика кількість іонів, однак вона позбавляє повітря властивості ідеального ізолятора, хоча електрична міцність його при цьому ще досить висока. При підмиканні до повітряного проміжку невеликої різниці потенціалів у повітрі з'являється занадто малий струм. Якщо прикладену напругу поступово збільшувати, то при певному значенні напруги відбувається різке збільшення струму, і повітряний проміжок раптово втрачає свої

ізолюючі властивості. Цей перехід газу або повітря в якісно новий стан називається “пробоем газового проміжку”.

Для зовнішньої ізоляції характерна залежність електричної міцності від метеорологічних умов, які визначають стан основного діелектрика – повітря. Так, на розрядні напруги суто повітряних проміжків впливають тиск, температура й абсолютна вологість повітря.

У зв’язку з цим повітряні ізоляційні проміжки вибирають так, щоб вони мали потрібну електричну міцність і при таких несприятливих сполученнях температури і вологості повітря, ймовірність появи яких невелика, але достатня, щоб впливати на надійнісні й економічні показники установок високої напруги.

Зовнішня ізоляція, як правило, має здатність швидко відновлювати свою електричну міцність до вихідного рівня після пробою і відімкнення її від джерела напруги.

У тих випадках, коли припустимі відімкнення установки на короткий час (частки секунди), ця обставина дозволяє істотно знизити вимоги до електричної міцності зовнішньої ізоляції, зменшити її габарити і вартість. Досягається це за рахунок того, що допускаються пробої ізоляції при найбільш високих, але різних електричних діяннях, проте передбачається їх швидке усунення шляхом вимикання напруги на короткий інтервал часу з наступним автоматичним повторним вмиканням установки.

Здатність зовнішньої ізоляції відновлювати електричну міцність дозволяє без необоротного руйнування виміряти фактичну розрядну напругу у кожного примірника ізоляційної конструкції і багаторазово випробовувати ту саму конструкцію.

Основний діелектрик зовнішньої ізоляції повітря – не підлягає старінню, тобто незалежно від діючих на ізоляцію напруг і режимів роботи обладнання його середні характеристики залишаються незмінними в часі. Тому для суто повітряних проміжків не існує проблеми строків служби, яка при створенні внутрішньої ізоляції є однією з найскладніших.

Будь-який газ, використовуваний як ізоляційне середовище, повинен задовольняти низку вимог, обумовлених специфікою високовольтних пристроїв. Перелічимо ці вимоги:

- газ має бути електрично якомога міцнішим;
- газ не повинен вступати в реакції з матеріалами, з яких виконані окремі елементи високовольтних апаратів, тобто він має бути хімічно інертним;
- іонізація газу не повинна супроводжуватися виділенням хімічно активних речовин;
- газ повинен мати якомога нижчу температуру скраплення;
- газ мусить мати таку вартість, щоб його застосування було економічно виправдане.

Різні гази зовсім неоднаково відповідають розглянутим вимогам. Так, повітря дешеве, має низьку температуру скраплення, але при іонізації виділяє низьку активних речовин (озон, окис і закис азоту). Тому замість повітря часто використовують інертний азот. Але обидва ці гази мають при нормальних атмосферних умовах порівняно низьку електричну міцність, підвищити яку можна або шляхом значного підвищення тиску, або створенням глибокого вакууму. І той, і інший шляхи пов'язані зі значним ускладненням конструкцій високовольтних апаратів.

Тому досить перспективним є використання як ізоляції газів, які мають електричну міцність значно більшу, ніж повітря або азот. Деякі з таких газів та їх властивості будуть розглянуті нижче.

У більшості випадків електричні розряди призводять до аварійних режимів роботи електроустановок, бувають причиною їх відмикання, а іноді й руйнувань. Щоб звести до мінімуму ймовірність відмови електроустановки через пробій газових проміжків, ці проміжки розраховуються виходячи з величини діючих напруг та ізолюючих властивостей газу. Для проведення таких розрахунків потрібне знання основних закономірностей, яким підлягає поведінка газових діелектриків при різних зовнішніх умовах і при зміні діючих напруг. Вивченню цих закономірностей присвячені наступні параграфи цього розділу.

## 1.2. Основні форми газового розряду та іонізаційні процеси в газовому середовищі

Електричний розряд у газовому середовищі може проходити по-різному залежно від величини прикладеної напруги, тиску газу, потужності джерела струму, будови електричного поля, опору зовнішнього кола.

Розрізняють чотири основні види розрядів у газах: тліючий, іскровий, дуговий і коронний. Тліючий розряд виникає при малих значеннях тиску (до декількох десятків мм рт.ст.) і малопотужному джерелі живлення. За цих умов газ не може набути великої провідності через недостатню кількість молекул в одиниці об'єму. Виявляється тліючий розряд як світіння газу, яке займає весь об'єм газового проміжку.

Густина струму незначна (20-50 мА/см<sup>2</sup>). Характерним для тліючого розряду є великий спад напруги біля катода (до 200-400 В). Тліючий розряд відбувається, наприклад, у газосвітільних трубках або лампах денного світла.

Іскровий розряд має місце при тиску газу, близькому до атмосферного, незначній потужності джерела струму. Розряд відбувається в одному або декількох вузьких зігнутих каналах, не займаючи всього об'єму газового проміжку. Концентрація іонів у каналі дуже висока, але величина струму, що протікає, обмежується потужністю джерела, хоча і більше, ніж при тліючому розряді.

Іскровий розряд нестійкий, переривчастий. Нестійкість його пояснюється тим, що при появі іскри різко знижується міжелектродний спад напруги, і розряд припиняється. Слідом за цим напруга знову зростає, знову виникає іскра і т.д.

Дуговий розряд спостерігається при тисках порядку атмосферного і вище при наявності потужного джерела струму. Супроводжується виникненням електричної дуги – стійкого провідного каналу між електродами. Густина струму в каналі може досягати величини  $10^5$  А/см<sup>2</sup>. Внаслідок протікання великого струму електроди і сам канал дуже нагріваються, що сприяє подальшому зростанню струму. Зростання струму уповільнюється по мірі того, як теплові втрати з каналу припиняють подальше підвищення температури.



Коронний розряд характерний для газових проміжків у різко неоднорідних, нерівномірних електричних полях. Такі поля утворюються, якщо один або обидва електроди мають малий радіус кривизни або відстань між електродами велика. Для виникнення коронного розряду необхідний близький до атмосферного тиск і висока різниця потенціалів між електродами. При виконанні цих умов поблизу електрода з меншим радіусом кривизни виникає місцевий розряд, який спостерігається як світіння. Суцільний провідний канал при коронуванні не утворюється, тому струм коронного розряду невеликий. Коронний розряд поширюється тільки на частину проміжку між електродами. Він найчастіше виникає на лініях електропередач. Корона для високовольтних ліній – явище небажане, оскільки вона є причиною корозії проводів, а також джерелом радіозавад у широкому спектрі частот. Крім того, доводиться рахуватись і з втратами на корону.

У даному посібнику детально будуть розглянуті іскровий і коронний розряди. Дуговий розряд вивчається в інших курсах, а тліючий розряд не властивий для електроустановок високої напруги.

Для атмосферного тиску характерним є розвиток розряду у вузькому каналі, так що в цих умовах пробій газу можна визначити таким чином: пробій газу – це раптове виникнення між електродами каналу високої провідності.

**Види іонізації в газі.** Причиною пробою газу може бути тільки його інтенсивна іонізація під дією електричного поля.

Іонізацією називається процес появи в газовому середовищі позитивно або негативно заряджених частинок – іонів. Іонізація газу може здійснюватись двома шляхами:

- в іони можуть перетворюватись нейтральні молекули або атоми самого газу; у цьому разі іонізація називається об'ємною;
- іони можуть виникати і ззовні, головним чином із катода; така іонізація називається поверхневою.

Як об'ємна, так і поверхнева іонізації можуть бути викликані різними причинами. Згідно з цим об'ємна іонізація може протікати як ударна іонізація, фотоіонізація і термічна

іонізація. Поверхнева іонізація за причинами виникнення підрозділяється на термоелектронну емісію, іонне бомбардування катода, фотоелектронну та автоелектронну емісії.

Розглянемо перелічені види іонізації більш детально.

**Ударна іонізація.** Ми вже знаємо, що в реальних умовах будь-який газ містить деяку кількість пар іонів. Якщо до електродів, які обмежують газовий проміжок, підвести напругу, то іони під дією сил електричного поля почнуть переміщатися, набуваючи кінетичної енергії. Рух іонів може завершитись одним із таких явищ:

- дифузією у зовнішню сферу;
- рекомбінацією в об'ємі газу, тобто утворенням із двох різнойменних заряджених іонів нейтральної молекули або атома;
- рекомбінацією на електродах;
- співударом з нейтральними або збудженими частинками газу.

З перелічених явищ найбільш масовим є останнє, тобто більшість іонів, що прийшли в рух, зазнає зіткнення з електрично нейтральними частинками газу. Якщо кінематична енергія зарядженої частинки виявиться достатньою для того, щоб “вибити” з нейтральної частинки електрон, то утвориться нова пара іонів. Ці нові іони починають прискорюватись полем, і деякі з них устигають набути енергії, достатньої для здійснення нових іонізацій. Описаний процес і отримав назву об'ємної ударної іонізації.

Слід зазначити, що ударна іонізація здійснюється майже виключно електронами. Це пояснюється тим, що електрони мають незначні порівняно з іонами й атомами розміри, а тому і більшу довжину вільного пробігу. На відміну від цього іони, маючи розміри, сумірні з розмірами нейтральних частинок, частіше зштовхуються з останніми, не встигаючи накопичувати достатню для іонізації кінетичну енергію.

Щоб іонізувати нейтральну молекулу, треба витратити на це певну енергію, яка називається енергією іонізації. Енергія іонізації вимірюється в електрон-вольтах (e·V). Електрон-вольт – це енергія, набута електроном при проходженні ним шляху між

двома точками з різницею потенціалів 1В (або інакше:  $1 e \cdot V$  – це енергія, яку витрачає електричне поле на переміщення електрона між двома точками з різницею потенціалів 1В).

Якщо прийняти заряд електрона за одиницю, то енергію іонізації можна чисельно виразити у вольтах. У цьому разі говорять про потенціал іонізації.

Потенціал іонізації – це різниця потенціалів вздовж шляху, який треба пролетіти електрону без зіткнень, щоб набути енергії, достатньої для здійснення ударної іонізації. Очевидно, що потенціал іонізації у вольтах чисельно дорівнює енергії іонізації в електрон-вольтах.

Потенціал іонізації різних газів знаходиться в межах від 4 до 25 В (енергія іонізації – відповідно від 4 до 25  $e \cdot V$ ). Так, потенціал іонізації гелію дорівнює 24 В, парів цезію – 3,88 В, а повітря – 12,5 В.

Акт ударної іонізації частинки газу може відбуватися в один етап або ступінчасто. Якщо кінетична енергія електрона до моменту співудару перевищує енергію іонізації або дорівнює їй

$$\frac{mV^2}{2} \geq W_i, \quad (1.1)$$

то іонізація відбувається в один етап. Такі співудари називаються ударами першого роду.

Ступінчаста іонізація має місце, коли кінетична енергія електрона менша за енергію іонізації, але співудар відбувається з частинкою, яка знаходиться у збудженому стані.

Збудженими називаються атом чи молекула, у яких один із електронів перейшов з нормальної орбіти на орбіту з більш високим енергетичним рівнем. Перехід частинки у збуджений стан і складає перший етап (першу ступінь) іонізації.

На збудження частинки витрачається квант енергії, тому електрон, який здійснює іонізацію, може мати кінетичну енергію, меншу  $W_i$ .

Співудар електрона зі збудженою частинкою називається ударом другого роду.

Умова, за якою можлива ступінчаста ударна іонізація, може бути записана у вигляді

$$\frac{mV^2}{2} + hv \geq W_i, \quad (1.2)$$

де  $hv$  – квант енергії, отриманий частинкою при збудженні;  
 $\nu$  – частота коливань випромінювання;  
 $h$  – стала Планка,  $h = 6.54 \cdot 10^{-34}$  Дж·с =  $6.54 \cdot 10^{-27}$  ерг·с.

Атоми більшості газів можуть знаходитись у збудженому стані дуже нетривалий час:  $10^{-7}$ - $10^{-8}$  с. Тому практично ступінчаста іонізація можлива лише у газів, у молекул яких є так звані метастабільні рівні. Збуджений стан частинок таких газів може продовжуватися до  $10^{-2}$  с. Пояснюється це тим, що перехід з метастабільного рівня на нормальний може відбуватись лише шляхом попереднього переходу на вищі рівні енергії. Такий перехід вимагає підведення енергії ззовні і, отже, певного часу.

Прикладом газу, у якого є метастабільні рівні, можуть бути пари ртуті. Найбільш яскраво метастабільні стани виражені у благородних газів.

**Об'ємна фотоіонізація.** Об'ємною фотоіонізацією називається іонізація газу, яка відбувається в результаті дії на нейтральні або збуджені частинки газу короткохвильового випромінювання.

Відомо, що енергія елементарних частинок (атомів, молекул) може змінюватись тільки певними кількостями – квантами. Тому для здійснення об'ємної фотоіонізації необхідно, щоб квант енергії випромінювання  $hv$  був рівним або більшим за енергію іонізації  $W_i$ :

$$hv \geq W_i. \quad (1.3)$$

Частоту короткохвильового випромінювання  $\nu$  можна виразити через довжину хвилі  $\lambda$  і швидкість світла  $C$  ( $C=3 \cdot 10^8$  м/с):

$$\nu = \frac{c}{\lambda}. \quad (1.4)$$

Тоді умова об'ємної фотоіонізації набуде вигляду

$$\lambda \leq \frac{ch}{W_i}. \quad (1.5)$$

Із останнього виразу (підставивши значення  $C$  і  $h$ ) можна визначити найбільшу довжину хвилі випромінювання, при якій ще можлива фотоіонізація газу з енергією іонізації  $W_i$ :

$$\lambda_{\max} = \frac{123 \cdot 10^{-5}}{W_i}, \text{ см.} \quad (1.6)$$

Найменшу енергію іонізації мають пари цезію ( $3.83 \text{ e}\cdot\text{В}$ ). Для іонізації інших газів, очевидно, потрібні випромінювання з коротшими довжинами хвиль.

Хвилі з такими довжинами лежать в ультрафіолетовій частині спектра частот. Із цього, зокрема, виходить, що видиме світло в нормальних умовах практично не іонізує, тому що має довжину хвилі у межах  $10^{-4} - 10^{-5}$  см.

Але й ультрафіолетове світло не в змозі безпосередньо іонізувати більшість газів через те, що гранично коротка довжина хвиль існуючих джерел ультрафіолетового світла складає  $(1,5-2) \cdot 10^{-5}$  см. При таких  $\lambda$  можлива іонізація тільки тих газів, енергія іонізації яких не перевищує  $6-8 \text{ e}\cdot\text{В}$

Однак на практиці спостерігається фотоіонізація ультрафіолетовими променями майже всіх газів. Зокрема, повітря, для якого  $W_i = 12,5 \text{ e}\cdot\text{В}$ , дуже інтенсивно іонізується при опроміненні його ультрафіолетовим світлом. Основні причини цього явища:

- ступінчаста фотоіонізація; кванти енергії випромінювання (фотони) спочатку збуджують частинки газу, а потім інші фотони завершують процес іонізації;
- наявність у повітрі пилу; пилинки – це тверді частинки; робота виходу електронів з поверхні твердих тіл менша, ніж енергія іонізації більшості газів, тому фотони порівняно легко вибивають із пилинок електрони.

Найінтенсивніше іонізують гази рентгенівські, радіоактивні та космічні промені. Фотони цих видів опромінювання звичайно мають енергію, яка значно перевищує енергію іонізації більшості газів. Тому при іонізації фотоном його енергія повністю не витрачається.

Надлишок енергії йде або на утворення фотона з меншою енергією, або на надавання електрону, звільненому від частинки, великої початкової швидкості. Такі електрони називають фотоелектронами.

Маючи дуже великі кінетичні енергії, фотоелектрони самі здатні здійснювати іонізацію.

Фотони в об'ємі газу можуть з'являтися не тільки ззовні, але і в процесі деіонізації самого газу, а також при переході збуджених частинок до нормального стану (перехід до нормального стану супроводжується, як відомо, виділенням кванта енергії – фотона). Такі фотони здатні здійснювати ступінчасту фотоіонізацію.

**Термічна іонізація.** Під термічною іонізацією розуміють процеси іонізації, обумовлені тепловим рухом частинок газу.

Відомо, що середня кінетична енергія частинок газу, нагрітого до температури  $T^0$  К, дорівнює

$$W_k = \frac{3}{2} kT, \quad (1.7)$$

де  $k$  – стала Больцмана,  $k = 1,37 \cdot 10^{-6}$  ерг/град.

При температурі  $20^\circ\text{C}$   $W_k = 3,8 \cdot 10^{-12}$  е·В, що в багато разів менше, ніж енергія іонізації будь-якого газу. У всій земній атмосфері при зазначеній температурі співудар молекул, який безпосередньо приводить до іонізації, можливий один раз в  $10^{500}$  років (за рахунок ступінчастої термоіонізації).

Термічна іонізація починає відігравати суттєву роль при температурі  $T > 4000^\circ\text{K}$ , що має місце в електричній дузі.

Ступінь іонізації газу при будь-якій температурі, тобто відношення числа іонізованих частинок до загального числа

атомів і молекул в одиниці об'єму газу, може бути визначена за формулою Саха

$$p \frac{m^2}{1-m^2} = 1,7 \cdot 10^{-6} T^{2,5} e^{-\frac{W_i}{kT}}, \quad (1.8)$$

де  $m$  – ступінь іонізації газу;  
 $p$  – тиск газу;  
 $W_i$  – енергія іонізації;  
 $k$  – стала Больцмана;  
 $T$  – абсолютна температура.

Підрахунок за формулою Саха показує, що для повітря, наприклад, усі частинки газу будуть іонізовані ( $m = 1$ ) при температурі 20800°К.

**Поверхнева іонізація.** Як уже говорилось, при поверхневій іонізації джерелом електронів, які надходять у газовий проміжок, є катод.

Вихід електронів з поверхні матеріалу катода може здійснюватись під дією різних факторів, а саме:

- при нагріванні катода (термоелектронна емісія);
- при бомбардуванні катода позитивними іонами, що мають енергію, яка перевищує роботу виходу ;
- при опроміненні катода короткохвильовим випромінюванням (фотоелектронна емісія);
- при дії сильного зовнішнього електричного поля (холодна автоелектронна емісія).

Автоелектронна емісія можлива при напруженості зовнішнього поля близько 1000 кВ/см, що в установках високої напруги буває рідко. Головну роль у поверхневій іонізації газових проміжків високовольтних устаткувань відіграють фотоелектронна емісія і бомбардування катода позитивними іонами.

Щоб електрон зміг залишити поверхню катода, треба здійснити певну роботу, яка називається роботою виходу і

вимірюється в електрон-вольтах. Робота виходу у різних металів різна і має значення, наведені в табл. 1.1.

Таблиця наочно показує, що робота виходу для металів менша за енергію іонізації газів. Тому, якщо, наприклад, опромінювати газовий проміжок та електроди будь-якими короткохвильовими променями, то поверхнева фотоелектронна емісія буде проходити інтенсивніше за об'ємну фотоіонізацію (за нормальних атмосферних умов і з величиною прикладеної напруги, яка не перевищує напруги пробою).

Таблиця 1.1

Робота виходу у різних металів

Метал	Робота виходу, e·V
Алюміній	1,8
Мідь	3,9
Залізо	3,9
Срібло	3,1
Платина	3,6

### 1.3 Виникнення і розвиток розряду в газі при однорідному електричному полі. Самостійний і несамостійний розряди

Формування і розвиток розряду в газі являє собою складний процес, при протіканні якого більшу чи меншу роль відіграють усі види іонізації.

Сучасна наука по-різному пояснює розвиток розряду в газі в залежності від того, відбувається розряд в однорідному чи неоднорідному полі.

Однорідне (рівномірне) електричне поле характеризується однаковою напруженістю у всіх його точках і незалежністю від полярності електродів.

Перша класична теорія розряду в газах при однорідному електричному полі була розроблена на початку минулого сторіччя фізиком Таунсендом. Таунсенд припустив, що процес формування розряду протікає лавиноподібно в напрямі від катода до анода, тобто, що кількість вільних електронів (і відповідно



позитивних іонів) лавиноподібно збільшується по мірі руху початкових електронів від катода до анода.

Ми вже говорили, що в природних умовах у газі завжди є деяка кількість вільних електронів. Таунсенд вважав, що ці електрони відіграють роль “запальних”, початкових зарядів у процесі пробою. Попадаючи в електричне поле, запальні електрони прискорюються і роблять об’ємну ударну іонізацію, у результаті чого утворюються нові (вторинні) вільні електрони і позитивні іони. Вторинні електрони теж прискорюються полем і у свою чергу роблять ударну іонізацію. Таким чином, кількість вільних електронів зростає під час руху в бік анода в геометричній прогресії. Позитивні іони рухаються в напрямі катода і, досягнувши його, проводять поверхневу іонізацію (бомбардування іонами). Визволені з поверхні катода електрони стають запальними, і процес повторюється.

Розглянемо утворення лавини електронів більш детально. При русі в елементарному об’ємі з площею  $1\text{см}^2$ , товщиною  $dx$ ,  $n$  електронів створять ударною іонізацією  $dn$  нових електронів:

$$dn = \alpha n dx, \quad (1.9)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт ударної іонізації;

$\alpha dx$  – кількість іонізацій, які робить один електрон на шляху  $dx$ .

Якщо припустити, що першопочатково у катода було  $n_0$  електронів, то кількість  $n$  електронів, що утворюються наприкінці шляху  $x$ , можна знайти, розділивши в (1.9) змінні і проінтегрувавши це рівняння в границях від  $n_0$  до  $n$  і від  $0$  до  $x$ :

$$\int_{n_0}^n \frac{dn}{n} = \int_0^x \alpha dx; \quad \ln \frac{n}{n_0} = \alpha x; \quad \frac{n}{n_0} = e^{\alpha x}; \quad n = n_0 e^{\alpha x}. \quad (1.10)$$

При  $n_0=1$   $n = e^{\alpha x}$ , тобто один електрон є причиною появи на шляху  $x$   $e^{\alpha x}$  нових електронів. Наприклад, якщо  $x = 1$  см,  $\alpha = 11$  (тобто при атмосферному тиску і  $E = 30$  кВ/см), то  $n = e^{11} = 59430$ .

Тепер легко знайти число  $n_a$  електронів, які попадають на одиницю поверхні анода, якщо з катода вилетіло  $n_0$  електронів:

$$n_a = n_0 e^{\alpha S}, \quad (1.11)$$

де  $S$  – відстань між електродами.

Якщо з катода вилетить один електрон  $n_0 = 1$ , то до анода підійдуть  $e^{\alpha S}$  електронів, з них  $e^{\alpha S} - 1$  – вторинні. Але оскільки при утворенні кожного вільного електрона з'являється позитивний іон, то можна стверджувати, що число утворених одним початковим електроном позитивних іонів (позначимо це число  $n_i$ ) дорівнює

$$n_i = e^{\alpha S} - 1. \quad (1.12)$$

Знаючи значення коефіцієнта поверхневої іонізації  $\gamma$ , легко визначити, яка кількість електронів буде вибита з катода позитивними іонами. Ця кількість, очевидно, дорівнює  $\gamma(e^{\alpha S} - 1)$ .

Розглянемо два такі випадки.

1.  $\gamma(e^{\alpha S} - 1) < 1$ , а фактично дорівнює нулю, тому що число електронів може бути тільки цілим. Це означає, що утворені в проміжку позитивні іони не змогли вибити з поверхні катода жодного нового електрона. Отже, по досягненні лавиною електронів анода розряд припиниться до тих пір, поки поблизу катода не з'явиться новий запальний електрон. Джерелом появи такого електрона можуть бути або природні іонізатори (космічні промені, радіоактивне випромінювання Землі та ін.), або штучні іонізатори (наприклад, кварцові лампи). І ті, й інші іонізатори по відношенню до газового проміжку є сторонніми.

Розряди, які для свого виникнення і підтримання вимагають наявності стороннього іонізатора і припиняються, якщо прибрати такий іонізатор, називаються несаможітними.

Таким чином, умова  $\gamma(e^{\alpha S} - 1) < 1$  відповідає несамостійному розряду.

2.  $\gamma(e^{\alpha S} - 1) = 1$ , тобто іони, які досягли катода, вибили з його поверхні один електрон. Електрон, що з'явився, утворює нову лавину з такою ж кількістю електронів та іонів, як і в початковій лавині. Отже, іони другої лавини знову вибивають з катода один електрон, він знову утворює лавину і т.д.

Ми бачимо, що в цьому разі розряд буде продовжуватись незалежно від того, чи є сторонній іонізатор, чи його немає.

Розряди, які можуть відбуватися тільки під дією прикладеної напруги без стороннього іонізатора, називаються самостійними.

Таким чином, умова  $\gamma(e^{\alpha S} - 1) = 1$  є умовою переходу несамостійного розряду в самостійний. Ясно, що розряд буде самостійним і тоді, коли  $\gamma(e^{\alpha S} - 1) > 1$  (що звичайно і має місце на практиці). Тому в більш загальному вигляді умову самостійності розряду записують таким чином:

$$\gamma(e^{\alpha S} - 1) \geq 1. \quad (1.13)$$

Пояснимо цю умову словами. Для самостійного розряду необхідно, щоб кожен електрон, пролітаючи шлях від катода до анода, утворив кількість позитивних іонів, достатню для вибивання з катода одного або більше вільних електронів.

Тут потрібно зробити істотне застереження. Раніше зазначалось, що поверхнева іонізація на катоді шляхом бомбардування його іонами ефективна лише при низьких тисках. Отже, умова (1.13) справедлива для низьких тисків.

При підвищених тисках (близьких до атмосферних і більше) визначальну роль в процесі утворення вільних електронів поблизу катода починає відігравати поверхнева фотоіонізація (фотоэффект). Джерелом фотонів у цьому разі є лавина, із якої фотони мусять випромінюватися при переході збуджених частинок до нормального стану.

Доведено [15], що якщо коефіцієнту  $\gamma$  в (1.13) надати значення коефіцієнта поверхневої фотоіонізації (кількість

електронів, які вибиваються із катода одним фотоном), то умова (1.13) буде справедливою і для підвищених тисків.

Таким чином, умову (1.13) можна вважати умовою самостійності розряду для будь-яких тисків. Треба тільки пам'ятати, що коефіцієнт  $\gamma$  має різне фізичне значення (і різні чисельні значення) для низьких і високих тисків.

#### 1.4. Розрядна напруга в однорідному електричному полі. Закон Пашена

Перехід несамостійного розряду в самостійний у рівномірному полі означає пробій проміжку. Використовуючи умову такого переходу

$$\gamma(e^{\alpha S} - 1) = 1, \quad (1.14)$$

можна знайти значення напруги, за якої настає пробій.

Назвемо напругу і напруженість, за яких несамостійний розряд переходить у самостійний, початковими і позначимо їх  $U_0$  і  $E_0$ .

Умова (1.14) може бути легко перетворена на вигляд

$$\alpha S = \ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right). \quad (1.15)$$

З теорії розряду в газах маємо  $\alpha = A p e^{-\frac{B p}{E}}$ .

Підставляючи значення  $\alpha$  в (1.15) і враховуючи, що при цьому  $E = E_0$ ,  $E_0 = \frac{U_0}{S}$ , одержимо

$$\alpha S = A p S e^{-\frac{B p S}{U_0}} = \ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right). \quad (1.16)$$

Після нескладних перетворень (1.16) дає

$$\frac{BpS}{U_0} = \ln \frac{ApS}{\alpha S} = \ln \frac{ApS}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)},$$

звідки знаходимо

$$U_0 = \frac{BpS}{\ln\left[\frac{ApS}{\ln(1 + 1/\gamma)}\right]}. \quad (1.17)$$

Ураховуючи, що  $A$  і  $B$  величини постійні (при незмінній температурі) і що коефіцієнт  $\gamma$  також може вважатися постійним, вираз (1.17) можна записати у загальному вигляді

$$U_0 = f(pS). \quad (1.18)$$

Залежність (1.18) вперше була експериментально встановлена німецьким ученим Пашеном і називається законом Пашена. У формулюванні словами цей закон говорить: при незмінній температурі розрядна напруга в рівномірному електричному полі є функцією добутку тиску на відстань між електродами. Це означає, що, якщо при різних умовах збільшити (зменшити) в  $m$  разів відстань між електродами і в стільки ж разів зменшити (збільшити) тиск у проміжку, то розрядна напруга залишиться незмінною.

Формула (1.17) була виведена Таунсендом і, як уся його теорія, ґрунтується на тому, що головну роль у формуванні розряду відіграє об'ємна ударна іонізація.

На рис. 1.1 наведені експериментальна і розрахункова залежності  $U_0 = f(pS)$  для повітря. З рисунку видно, що крива  $U_0 = f(pS)$  має мінімум, відповідний  $U_0 = 327$  В при  $pS = 5.7$  мм рт.ст. Це означає, що напругою, меншою 327 В, повітря не може бути пробито ні за яких умов.

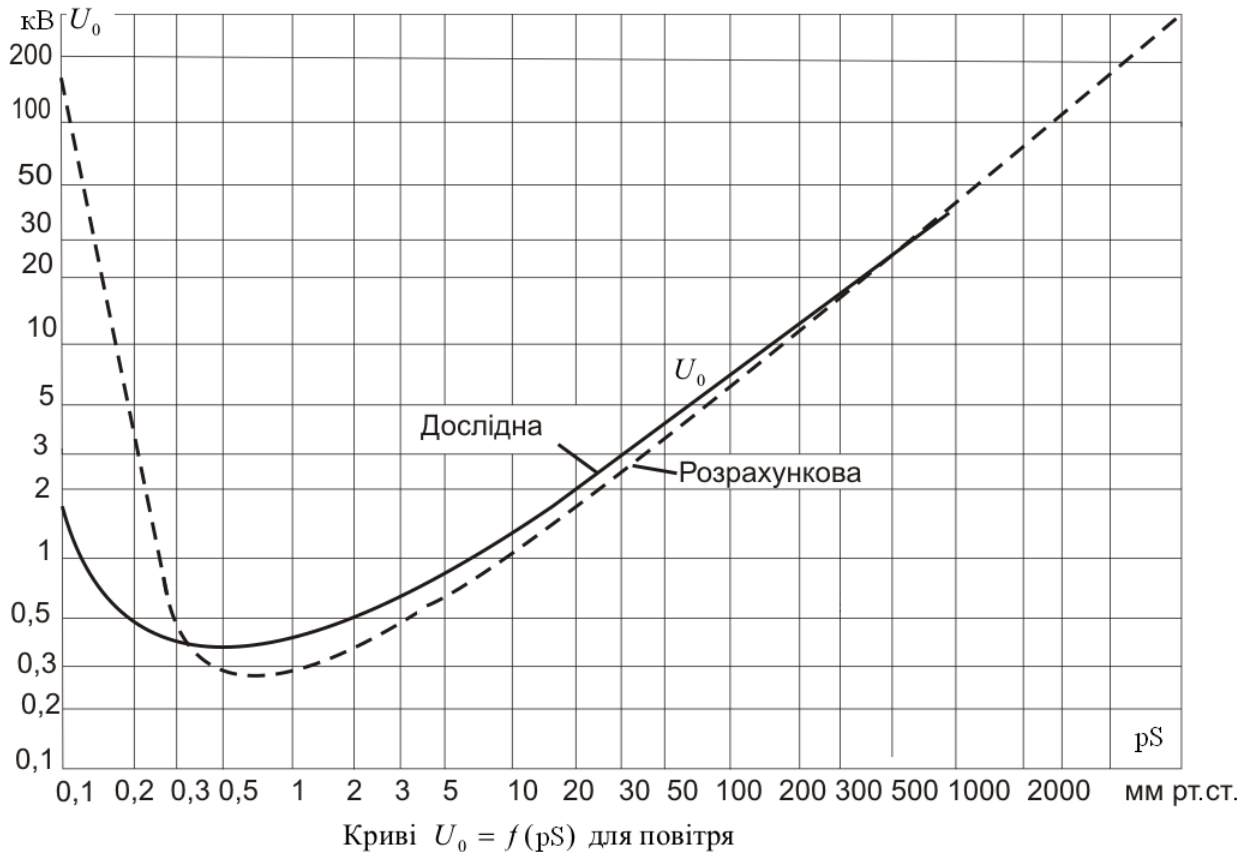


Рис. 1.1. Графічна інтерпретація закону Пашена

Наявність мінімуму пробивної напруги можна пояснити таким чином. Інтенсивність ударної іонізації визначається двома факторами: кількістю співударів електронів з частинками газу та ймовірністю того, що співударі закінчуються іонізацією. Причому для того, щоб розряд був самостійним, необхідно, щоб добуток зазначених величин був досить визначеним і постійним.

Це виходить із фізичних міркувань та з (1.15):

$$\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) = \alpha S = A p S e^{-\frac{B p S}{U_0}} = \text{const.} \quad (1.19)$$

Аналізуючи вираз  $A p S e^{-\frac{B p S}{U_0}}$ , неважко бачити, що  $A p S$  є кількість зіткнень, яких зазнає кожен електрон на шляху  $S$ , а

$e^{-\frac{VpS}{U_0}}$  - імовірність того, що зіткнення закінчиться іонізацією. При зміні  $pS$  кількість зіткнень (позначимо її  $N$ ) змінюється за лінійним законом, а ймовірність іонізації (позначимо через  $Z$ ) - за експонентою.

На рис. 1.2 подані залежності  $N=f(pS)$  і  $Z=f(pS)$ .

При великих значеннях  $pS$  (від точки мінімуму  $U_0$  на рис. 1.1 праворуч) імовірність іонізації  $Z$  зменшується повільніше, ніж зростає кількість зіткнень  $N$ . Тому, якщо б прикладена до проміжку напруга залишалася незмінною, то при збільшенні  $pS$  інтенсивність іонізації  $\alpha S$  зменшилась і розряд би припинився. Для підтримання розряду в цьому разі (при збільшенні  $pS$ ) є тільки один засіб – збільшення прикладеної напруги (при цьому зростає ймовірність іонізації). Цей факт і відображає права вітка кривої на рис. 1.1.

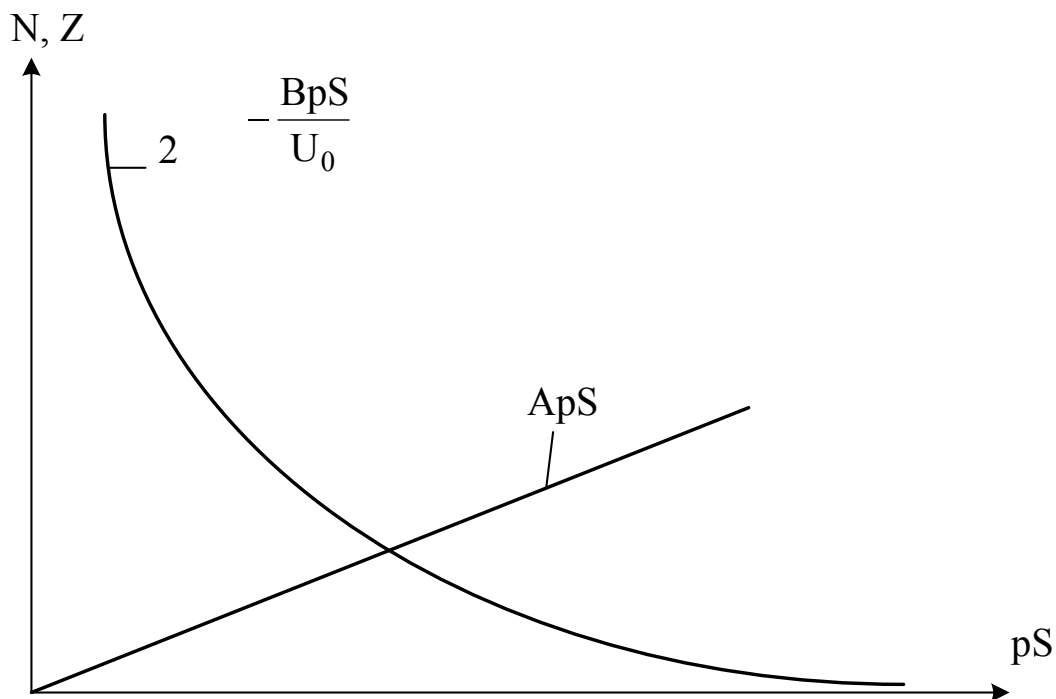


Рис. 1.2. До пояснення наявності мінімуму кривої, побудованої за законом Пашена

При зменшенні  $pS$  (ліворуч від  $U_{0min}$ ) переважаючим є зменшення кількості зіткнень, за рахунок чого умова самостійності розряду знову порушується. Щоб підтримати розряд, і в цьому разі доводиться підвищувати прикладену напругу (ліва вітка кривої на рис. 1.1).

Для отримання розряду при дуже малих значеннях  $pS$  теоретично необхідно, щоб  $U_0$  зростало до нескінченності (розрахункова крива на рис. 1.1). Однак досвід показав, що при будь-якому ступені розрідження розряд все ж настає при кінцевих значеннях  $U_0$ . Пояснюється це тим, що при малих  $pS$  і великих  $U_0$  починають виявлятися процеси автоелектронної емісії з катода.

Слід зазначити, що ліва вітка кривої рис. 1.1 практично відповідає сильним розрідженням, а не малим відстаням, оскільки створити проміжки з  $S < 10^{-2}$  см технічно важко.

Повернемось тепер до формули (1.17). Вона була отримана в припущенні незмінюваності температури. Існує інший вираз для закону Пашена, який ураховує вплив температури. Відомо, що тиск і температура пов'язані між собою через відносну густину повітря  $\delta$ :

$$\delta = 0.386 \frac{p}{T}. \quad (1.20)$$

Закон Пашена з урахуванням відносної густини повітря записується у вигляді

$$U_0 = f(\delta S) \quad (1.21)$$

і формулюється так: у рівномірному електричному полі розрядна напруга є функцією добутку відстані між електродами на відносну густину повітря.

На завершення зазначимо, що на практиці розрахунок початкових значень пробивної напруги і напруженості електричного поля роблять за емпіричними формулами.

Так, для  $S = 0.1-1.0$  см можна користуватися формулами



$$U_0 = 30\delta S + 1,36 \text{ кВ}; \quad (1.22)$$

$$E_0 = 30\delta + \frac{1.36}{S}, \text{ кВ/см.} \quad (1.23)$$

Для проміжків до 12 см можна застосовувати формули Рітца

$$U_0 = 24,55\delta S + 6,66\sqrt{\delta S}; \quad (1.24)$$

$$E_0 = 24,55\delta + 6,66\sqrt{\frac{\delta}{S}}. \quad (1.25)$$

У разі змінного струму величини  $U_0$  і  $E_0$  відповідають амплітудним значенням.

Відзначимо відмінності в механізмі процесу пробую проміжку з різконеоднорідним полем від проміжку з однорідним полем:

- величина напруги пробую залежить від полярності прикладеної напруги (ефект полярності);

- виникнення у проміжку самостійного розряду не завжди означає пробій проміжку; він може закінчитись утворенням корони;

- напруга пробую нижча, ніж в однорідному полі, внаслідок концентрації магнітних силових ліній біля стержня;

- вплив тиску на величину пробивної напруги менш значний, ніж в електричному полі з рівномірним розподілом магнітних силових ліній.

Більш детально розряд у різконеоднорідному полі разом зі стримерною теорією формування розрядів у газах розглянуто в [29].

## 1.5. Високоміцні гази

Різні гази мають неоднакову електричну міцність. Для оцінки ізолюючих властивостей газу користуються поняттям відносної електричної міцності, під якою розуміється відношення пробивної напруги даного газу до пробивної напруги повітря (за інших рівних умов).

У табл. 1.2 наведені значення відносної електричної міцності  $\delta_e$  деяких газів.

Таблиця 1.2

Значення відносної електричної міцності деяких газів

Газ	$\delta_e$
Повітря	1.0
Азот (N <sub>2</sub> )	1.0
Водень (H <sub>2</sub> )	0.6
Елегаз (SF <sub>6</sub> )	2.5
Фреон (CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub> )	2.5

Відомі гази (наприклад, тетрахлорметан CCl<sub>4</sub>) мають шестеро вищу електричну міцність, ніж повітря. Однак вони не відповідають ряду найважливіших вимог, які ставляться до ізолюючих газів. Так, тетрахлорметан має високу температуру скраплення (+76<sup>0</sup>C) і при нагріванні розкладається, виділяючи при цьому хімічно активні речовини.

Найбільш повно поставленим вимогам (вони були сформульовані в п.1.1) відповідають елегаз (гексафторид сірки) і фреон (діхлордифторметан).

Підвищена електрична міцність цих газів пояснюється такими причинами:

1. Фреон і елегаз мають крупні молекули, тому середня довжина вільного пробігу електронів у цих газах мала, електронам важко пролетіти без зіткнень шлях, достатній для набуття кінетичної енергії, яка перевищує енергію іонізації.

2. Зазначені гази належать до галогенідів, які, як відомо, мають схильність “набувати” вільні електрони, утворюючи при цьому негативні малорухомі іони. Ця обставина утруднює утворення лавини електронів, що в кінцевому рахунку приводить до збільшення пробивної напруги.

3. Частина енергії вільних електронів витрачається на поляризацію і дисоціацію молекул газу, що також утруднює набуття електронами енергії, яка перевищує  $W_i$ .

Кращі фізико-хімічні властивості має елегаз. Він нешкідливий, вибухо- і пожегобезпечний, має нижчу за фреон температуру скраплення, хімічно інертний, до температури 800<sup>0</sup>С не розкладається. Єдиний недолік елегазу – його висока порівняно з фреоном вартість.

Тому на цей час фреон застосовується ширше, ніж елегаз. Обидва гази уже використовуються в рентгенівських установках, у високовольтних конденсаторах та електростатичних генераторах. Перспективним є застосування елегазу в газонаповнених кабелях, тому що стиснутий до  $9.8 \cdot 10^5$  Па, він разом з кабельним папером забезпечує таку ж електричну міцність, як і масло.

Перевагою фреону й елегазу є ще й та обставина, що вони мають практично лінійну залежність пробивної напруги від відстані між електродами та від тиску.

### **Контрольні питання**

1. Дайте визначення зовнішньої ізоляції.
2. Перелічіть особливості зовнішньої ізоляції.
3. Дайте визначення пробою газового проміжку.
4. Перелічіть вимоги до газів, використовуваних як ізоляційне середовище.
5. Назвіть основні форми газового розряду та охарактеризуйте будь-яку з них.
6. Що таке іонізація газового середовища?
7. Назвіть види іонізації в газі.
8. Яка іонізація має місце в електричній дузі?
9. Дайте визначення самотійному і несамотійному розрядам.
10. Сформулюйте закон Пашена. Назвіть причини такої залежності.
11. Поясніть наявність мінімуму в кривій, побудованій за законом Пашена.
12. Назвіть особливості розряду у різконеоднорідному полі.
13. Наведіть приклад високоміцних газів.
14. Чим пояснюється підвищена електрична міцність високоміцних газів?

## Розділ 2

# ІМПУЛЬСНА МІЦНІСТЬ ПОВІТРЯНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ. КОРОННИЙ ТА ПОВЕРХНЕВИЙ РОЗРЯДИ

### 2.1., Розряди при імпульсних напругах

Імпульсні напруги мають аперіодичну форму і короткочасний характер. Звичайно електроустановки підпадають під дію імпульсних напруг у результаті ударів блискавки в проводи повітряних ліній електропередачі. При цьому на проводах виникають електромагнітні хвилі, які мають форму аперіодичних імпульсів з амплітудою в мільйони вольт і тривалістю в десятки мікросекунд. Поширюючись уздовж ліній, імпульсні хвилі діють на лінійну ізоляцію та ізоляцію електрообладнання електричних станцій і підстанцій. У зв'язку з цим високовольтне електрообладнання повинно володіти певною імпульсною міцністю, тобто мати певні розрядні характеристики при імпульсних впливах.

Величини імпульсних напруг, які електрообладнання повинно витримати без виникнення розрядів (випробувальні напруги), установлюються у відповідності до величин можливих імпульсних розрядів з урахуванням дії захисних апаратів.

Імпульсна хвиля характеризується амплітудою, довжиною фронту і повною довжиною. Довжина фронту і повна довжина хвиль виражаються в мікросекундах і визначаються відповідно відрізками  $\tau_f$  і  $\tau_{хв}$  (рис. 2.1).

Ділянка наростання напруги називається фронтом хвилі, ділянка спаду напруги – хвостом хвилі. Аналітично форма хвилі добре апроксимується різницею двох експонент:

$$U = U_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}),$$

де коефіцієнт  $\alpha$ , що характеризує спад напруги на хвості хвилі, багато менше  $\beta$ , що характеризує підйом напруги на фронті хвилі. Довжини фронту і хвоста визначаються з побудови, показаної на рис. 3.1.

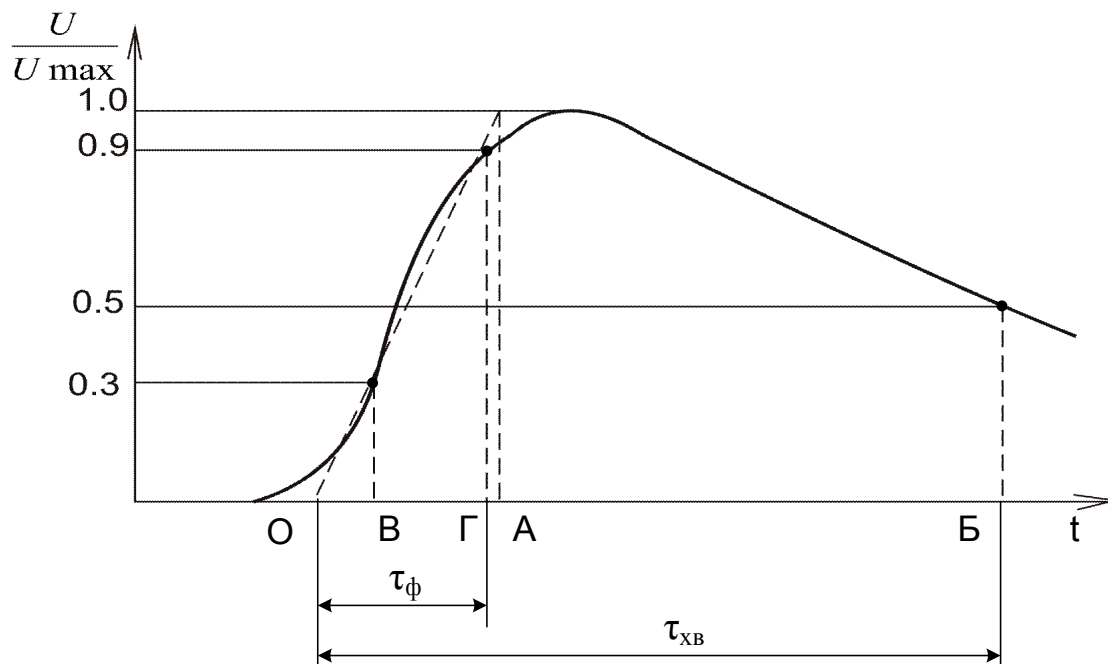


Рис. 2.1. Стандартна хвиля випробної імпульсної напруги (повний імпульс): ОГ – довжина фронту імпульсу; ОБ – довжина імпульсу

Дослідженнями встановлено, що пробій газів при дії імпульсних напруг відбувається звичайно при більших напругах, ніж у випадку постійної або змінної напруги. Це пов'язано з тим, що час дії імпульсу малий і має один порядок з часом формування розряду. Причому імпульс може бути настільки короткий, що розряд зовсім не відбудеться.

Короткочасність дії імпульсної хвилі вимагає для розвитку пробую більш високих амплітуд напруги, ніж при тривало діючій напрузі.

Розглядаючи пробій при імпульсах, необхідно звернути увагу на розвиток процесу в часі. Звичайно при короткочасних імпульсних діях, коли напруга на фронті хвилі досягає значення напруги пробую при тривалій дії ( $U_c$  – статистична пробивна напруга), пробую не відбувається. Це пояснюється тим, що для розвитку розряду необхідний певний час – більший, ніж при досягненні величини  $U_c$  при імпульсній хвилі. Відрізок часу від моменту досягнення статистичної пробивної напруги до моменту кінцевого формування розряду називається часом запізнювання

розряду. У свою чергу час запізнювання розряду складається із статистичного часу запізнювання  $t_{ст}$  і часу формування розряду  $t_{ф}$

$$t_{зап} = t_{ст} + t_{ф} . \quad (2.1)$$

Величина  $t_{ст}$  обумовлюється відсутністю в момент досягнення статичної пробивної напруги в розрядному проміжку початкових електронів, які можуть створити електричну лавину в результаті ударної іонізації. Величина  $t_{ст}$  залежить від величини прикладеної напруги, матеріалу катода і т. д.

При опроміненні катода короткохвильовим випроміненням, яке створює поверхневу фотоіонізацію, імовірність появи початкового "запального" електрона збільшується і час  $t_{ст}$  зменшується.

Час формування розряду  $t_{ф}$  обумовлено швидкістю руху електронної лавини і швидкістю поширення стримера. Величина  $t_{ф}$  зменшується при збільшенні напруженості поля і зменшенні тиску і пропорційна довжині розрядного проміжку.

При імпульсних випробуваннях ізоляції використовують імпульсні хвилі постійної довжини – стандартні імпульсні хвилі. Звичайно використовуються дві стандартні хвилі: повна хвиля 1,5/40, що має довжину фронту 1,5 мкс і повну довжину 40 мкс, а також зрізана – з часом зрізу не менше 2 мкс (рис. 2.2).

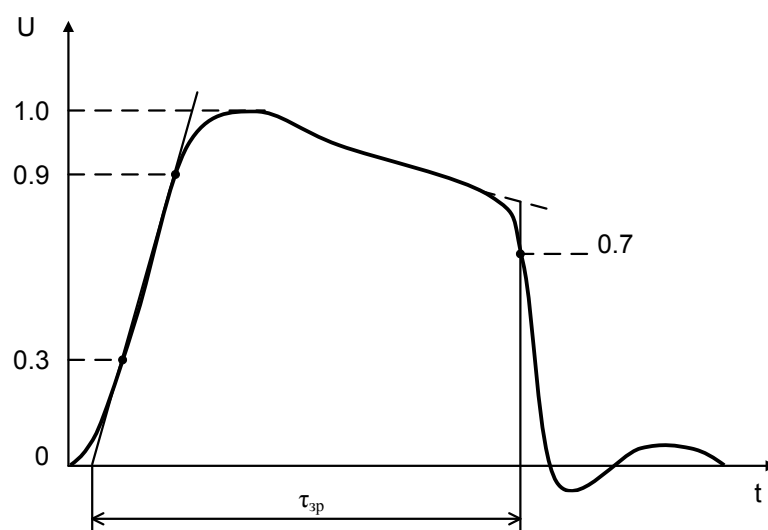


Рис. 2.2. Стандартна хвиля випробної імпульсної напруги (зрізаний імпульс):  $\tau_{зр}$  – час зрізу

Для зрізу напруги застосовуються розрядники, увімкнені паралельно випробуваному об'єкту. При проведенні імпульсних випробувань ізоляції необхідно знати характеристики її імпульсної міцності.

## 2.2. Характеристики імпульсної міцності ізоляції

У наш час для оцінки імпульсної міцності ізоляції використовуються такі характеристики.

Для порівняння пробивної імпульсної напруги з напругою при тривалому діянні (статичній пробивній напрузі) використовується коефіцієнт імпульсу  $\beta$

$$\beta = \frac{U_{\text{імп}}}{U_c} . \quad (2.2)$$

Коефіцієнт імпульсу звичайно більше одиниці. Величина його залежить від тривалості імпульсу і характеру електричного поля розрядного проміжку. У нерівномірних полях коефіцієнт імпульсу вище, ніж у рівномірних. Із зменшенням довжини імпульсної хвилі розрядна імпульсна напруга збільшується і коефіцієнт імпульсу зростає.

За пробивну імпульсну напругу у виразі (2.2) приймають амплітуду імпульсної напруги, яка приводить до пробою проміжку в 50 % випадків, тобто та напруга, при якій із загального числа хвиль, що подаються на випробуваний об'єкт, 50 % хвиль приводять до пробою, а 50 % не дають пробою. Це так звана 50%-на розрядна напруга. Цілком очевидно, що чим більша величина розрядної напруги, тим міцність ізоляції вища.

Визначення імпульсних розрядних напруг проводиться дослідним шляхом. Як джерело імпульсних хвиль застосовуються генератори імпульсних напруг.

Значення 50%-них розрядних напруг при діянні повної хвилі визначаються за дослідними кривими, які наводяться в довідковій літературі.

Більш повно, ніж коефіцієнт імпульсу, характеризують поведінку ізоляційних проміжків при імпульсах вольт-секунді характеристики. Ці характеристики встановлюють зв'язок між амплітудою імпульсу і повним часом розряду – часом від моменту прикладення напруги до завершення розряду.

Для отримання вольт-секундної характеристики необхідно випробуваний об'єкт піддати діянню стандартних імпульсних хвиль різної амплітуди. У залежності від величини амплітуди імпульсу розряд буде відбуватись в різний час розряду  $t_p$ . За допомогою електронного осцилографа можна зафіксувати форму й амплітуду імпульсної хвилі і часу розряду в кожному випадку. На підставі цих даних будують вольт-секундну характеристику, як це показано на рис. 2.3.

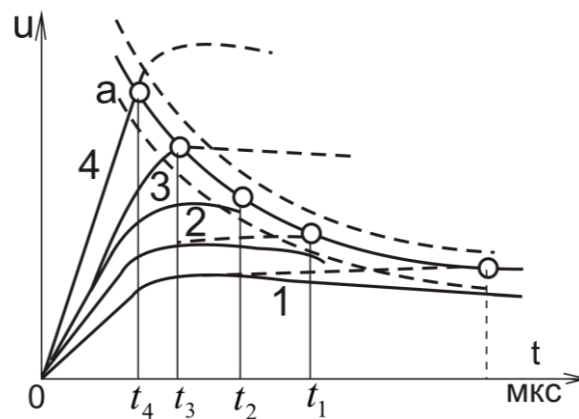


Рис. 2.3. Побудова вольт-секундної характеристики

Якщо розряд відбувається на хвості хвилі, то точки вольт-секундної характеристики пов'язують час розряду  $t_p$  і амплітуду імпульсу.

Якщо розряд відбувається на фронті хвилі, то ці точки пов'язують час розряду  $t_p$  з напругою імпульсу в момент розряду.

Властивості вольт-секундної характеристики:

- вольт-секундні характеристики газових проміжків з однорідним полем більш пологі, ніж для різконеоднорідних полів (рис. 2.4);

- вольт-секундні характеристики з різною полярністю імпульсу відрізняються одна від одної (рис. 2.5).



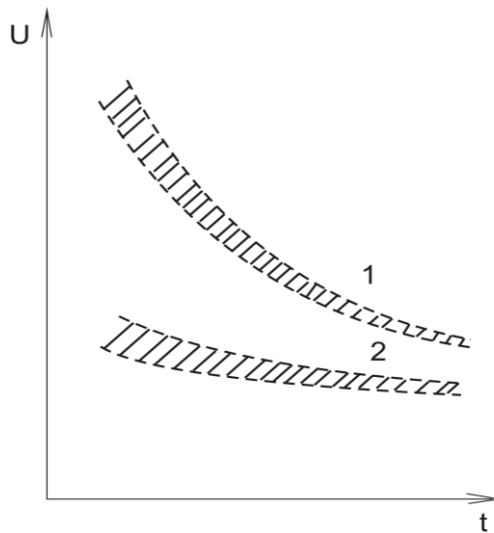


Рис. 2.4. Приблизна форма вольт-секундних характеристик для різконеоднорідного (1) та однорідного (2) полів

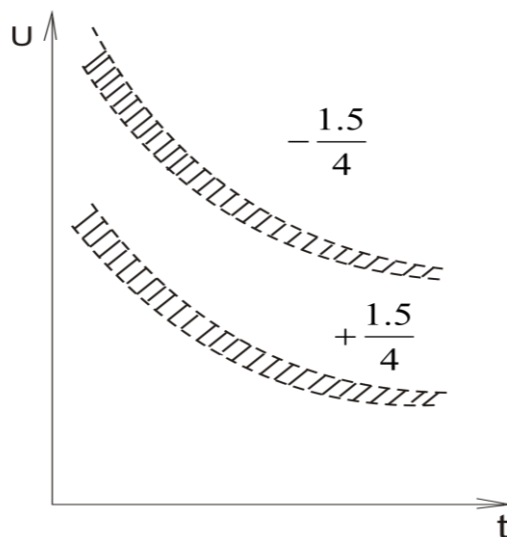


Рис. 2.5. Приблизна форма вольт-секундних характеристик при імпульсах різної полярності. В чисельнику – тривалість фронту імпульсу (мкс), в знаменнику – тривалість зрізаного імпульсу (мкс)

Вольт-секундні характеристики мають суттєве значення при захисті електрообладнання від дії набігаючих імпульсних хвиль за допомогою захисних розрядників. Характеристики захисних розрядників повинні лежати нижче характеристик захищеної

ізоляції. У цьому разі небезпечні імпульсні напруги будуть приводити до розрядів у захисних розрядниках, а не в захищуваних об'єктах.

В ізоляційних конструкціях часто застосовують спеціальні заходи для вирівнювання поля, тому вольт-секундні характеристики ізоляції пологі, такими ж мають бути і характеристики розрядників. Необхідно враховувати, що вольт-секундні характеристики ізоляції визначаються при позитивному електроді.

Розрядні напруги повітряних проміжків можна характеризувати не тільки вольт-секундними характеристиками, але і так званими кривими ефекту або кривими ймовірності розряду  $P_p(U)$ . Припустимо, що при багаторазовому прикладенні до проміжку повної хвилі амплітудою  $U$  ведеться підрахунок кількості іскрових розрядів у проміжку. Якщо хвиля подавалась  $N$  разів, а число розрядів при цьому дорівнює  $n$ , то ймовірність розряду

$$P_p(U) = \frac{n}{N}. \quad (2.3)$$

При малій напрузі розряд не відбувається і  $P_p = 0$ , при збільшенні  $U$   $P_p$  зростає до одиниці. Значенню  $P_p = 0,5$  відповідає середня розрядна напруга. Залежність  $P_p(U)$  і називається кривою ефекту. При більшій кількості дослідів крива ефекту співпадає з теоретичною кривою нормального розподілу.

Визначимо зв'язок кривої ефекту з вольт-секундною характеристикою. Крива ефекту дає розкид розрядних напруг при дії повної хвилі, в той час як при побудові вольт-секундної характеристики отримуємо розкид розрядних напруг при дії також зрізаних хвиль різної довжини.

Отже, вольт-секундна характеристика дає суттєво більше інформації про розрядні напруги проміжку.

Криві ефекту знімаються значно простіше, ніж вольт-секундні характеристики. За кривими ефекту можна також оцінити захищеність ізоляції розрядником.

### 2.3. Загальна характеристика коронного розряду

При вивченні розряду в різконеоднорідному полі було встановлено, що при деякій напрузі виникають лавини електронів і стримери, які не викликають пробою проміжку, хоч розряд і є самостійним. Така лавинно-стрімерна форма стійкого газового розряду в різконеоднорідному полі, супроводжуваного світінням у вигляді ореолу, який оточує електрод, називається коронним розрядом. Світна область, в якій напруженість поля достатня для підтримання самостійного розряду, називається чохлом корони. Цей вид розряду утворюється при напрузі, яка називається напругою виникнення корони.

Хоч при коронному розряді пробою проміжку у вигляді електричної іскри або дуги не відбувається, однак він суттєво впливає на роботу електротехнічного обладнання, тому розроблені заходи або боротьби з ним, або його використання. Коронний розряд викликає такі шкідливі явища: втрати електроенергії, радіозавади, механічну вібрацію і шуми, сприяє корозії. Причина корозії полягає в тому, що коронний розряд у повітрі супроводжується утворенням озону ( $O_2$ ) і оксидів азоту ( $NO_2$ ). Останні реагують з вологою повітря й утворюють хімічно агресивні кислоти  $HNO_2$  і  $HNO_3$ , які руйнують ізоляційні та металеві конструкції. Таку ж дію виконує й озон.

Слід зауважити, що у деяких випадках коронний розряд сприяє обмеженню перенапруг. Явище корони використовується, крім того, в електричних димових фільтрах для запобігання забрудненню атмосфери [17].

На ЛЕП може виникнути загальна і місцева корона. Загальна корона утворюється на всьому проводі у вигляді світлого чохла, місцева утворюється в окремих місцях у вигляді світних областей, де виходить велика місцева напруженість електричного поля: на задирках, паморозі, краплях дощу. Слід розрізняти уніполярний і біполярний режими коронного розряду. Уніполярний режим виникає між електродом і заземленою конструкцією (землею). Біполярний режим характерний для проміжку між двома коронуючими електродами, що знаходяться

під різним потенціалом, наприклад, між проводами різних полярностей або різних фаз.

Коронний розряд по-різному проходить при постійній і змінній напругах.

## 2.4. Корона при постійній і змінній напругах

Вивчимо спочатку уніполярний режим коронного розряду як при позитивному електроді (рис. 2.6, а), так і при негативному (рис. 2.6, б).



Рис. 2.6. Уніполярний режим корони при позитивній (а) та негативній (б) напругах

На основі викладеного в п.1.4 можна легко зрозуміти, що навколо електрода утворюється об'ємний заряд тієї ж полярності. Напруженість, при якій з'являється корона на круглому гладкому стержні в уніполярному режимі, називається початковою напруженістю  $E_p$ . Вона залежить від відносної густини  $\delta$  газу і від радіуса проводу  $r$ .

Відносна густина  $\delta$  газу – це густина газу при довільних значеннях тиску  $p$  і температури  $t$  в частках від густини при нормальних значеннях  $p_0$  і  $T_0$ , що беруться рівними:

$$p_0 = 760 \text{ мм рт. ст.};$$

$$T_0 = 273 + 20 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Оскільки при збільшенні густини зменшується довжина вільного пробігу частинок, а отже, і їх іонізуюча здатність, то чим

більше  $\delta$ , тим буде більше і  $E_p$ . Якщо радіус проводу більше, то при однаковій напрузі концентрація магнітних силових ліній навколо проводу буде менше, а це означає, що буде менше й початкова напруженість корони. Ці два фактори дуже важливі при визначенні способів зменшення корони.

У результаті коронування навколо проводу утворюється об'ємний заряд. Наявність його робить напруженість поля навколо проводу більш рівномірною, що знижує інтенсивність іонізації.

Настає момент, коли між процесами іонізації і рекомбінації встановлюється динамічна рівновага. Слід пам'ятати, що при напрузі, близькій до початкової, струм корони має пульсуючий характер, як у позитивного, так і негативного електродів.

Біполярний режим корони при постійній напрузі наведений на рис. 2.7. У цьому випадку позитивні іони рухаються до катода, а негативні – до анода, частина з них при цьому рекомбінує (на рис. 2.7 вони обведені овалом), а решта іонів, увійшовши в область навколо свого однойменного електрода, підсилює інтенсивність об'ємного заряду, і тому в біполярному режимі коронний розряд може підтримуватися при дещо меншій напрузі, ніж в уніполярному, тобто в цьому разі початкова напруженість менша. Особливо це характерно для процесів, що відбуваються біля позитивного електрода. Мінімальна напруга, при якій підтримується розряд у присутності зустрічного потоку іонів протилежної полярності, називається критичною напругою корони  $U_k$ , а відповідна їй напруженість на поверхні електрода – критичною напруженістю  $E_k$ . Сумарний ток біполярної корони більше, ніж уніполярної.

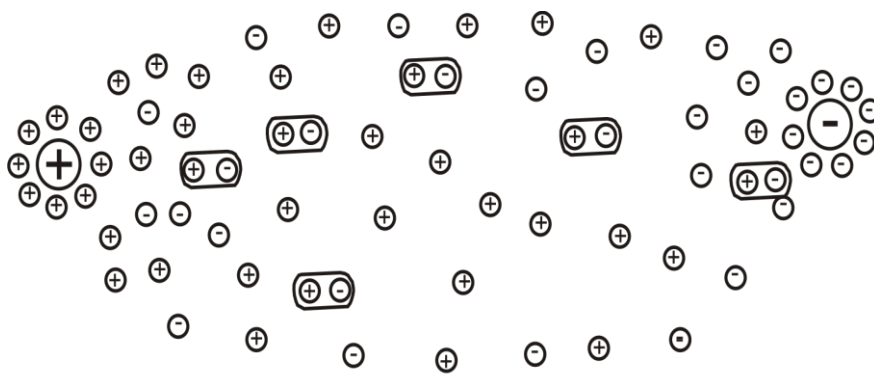


Рис. 2.7. Біполярний режим корони

Поле навколо циліндричного проводу за своєю будовою аналогічне полю циліндричного конденсатора. Тому величина  $E_k$  визначається таким чином: напруженість поля циліндричного конденсатора на відстані  $r$  від його осі дорівнює

$$E_k = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r_0}}, \quad (2.4)$$

де  $U$  - прикладена напруга;  
 $R$  - відстань між електродами;  
 $r_0$  - внутрішній радіус циліндра.

Оскільки  $E_k$  шукають на поверхні проводу, то  $r = r_0$ , тоді

$$E_k = \frac{U_k}{r_0 \ln \frac{R}{r_0}}. \quad (2.5)$$

Звідси можна знайти

$$U_k = E_k r_0 \ln \frac{R}{r_0}. \quad (2.6)$$

Уніполярний режим корони можливий на електроді зі змінною напругою, коли всі утворені за півперіод іони встигають досягти заземленого провідника і нейтралізуватись на ньому. Повна нейтралізація можлива при достатньо малій відстані між електродами і відносно невеликій частоті. У протилежному випадку, тобто через більшу відстань або дуже велику частоту одиничний електрод опиниться в біполярному режимі, бо при зміні півперіоду в проміжку між електродами залишаться іони, полярність яких буде протилежна напруженості поля. Вони можуть зберегтись і в наступних півперіодах.

У звичайному біполярному проміжку зі змінною напругою іони змінюють напрям свого дрейфу при зміні полярності напруги і підсилюють напруженість поля в зоні у електродів, при

цьому процеси іонізації підсилюються, струм корони зростає. Установлено, що при промисловій частоті максимальний радіус об'ємного заряду навколо фазного проводу значно менше відстані між проводами різних фаз. Щоправда, є ще заряд, який переміщається між фазними проводами, але він нехтовно малий.

На іонізацію повітря і переміщення зарядів витрачається енергія, яка називається втратами на корону. Ці втрати можуть бути значні у залежності від номінальної напруги передачі.

Втрати на корону при постійній напрузі визначають експериментально. Установлено, що втрати на корону при постійній напрузі вдвоє менші, ніж при змінній (для напруг 110-330 кВ). По мірі збільшення напруги різниця у втратах зменшується. Втрати на уніполярну корону виявляються менші, ніж на біполярну, тому що в останньому випадку рекомбінація іонів відбувається неповністю. Частина їх проникає до протилежного електрода (рис. 2.7), що підсилює там напруженість, а це приводить до посилення іонізації і збільшення втрат на корону.

Втрати на корону в усіх трьох проводах при частоті змінного струму 50 Гц можуть бути визначені з використанням виразу

$$\Delta P_k = \frac{0.18}{\delta} \sqrt{\frac{r}{D}} (U - U'_k), \quad (2.7)$$

де  $U$  – лінійна напруга;

$$U'_k = 84,6 \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot \delta \cdot r \cdot \lg \frac{D}{r}.$$

У цьому випадку необхідність розрахунку втрат на корону визначається з умов:

1) якщо  $U < U'_k$ , то втрат на корону немає і розрахунок можна не виконувати;

2) якщо  $U > U'_k$ , то втрати підраховуються за формулою (2.7).

Для зменшення втрат на корону застосовують такі заходи:

1) збільшують діаметр проводу. Мінімально припустимий діаметр знаходять із співвідношення [9]

$$d_{\min} = 1,15 \cdot 10^{-2} U_{\text{ном}}, \quad (2.8)$$

де  $d_{\min}$  – діаметр проводу;

$U_{\text{ном}}$  - номінальна напруга;

2) покращують поверхню (гладкість) проводу;

3) розщеплюють фази (цей спосіб запропонував акад. Міцкевич у 1911 р.).

## **2.5 Особливості розвитку розряду на поверхні твердих діелектриків**

Будь-яка ізоляційна конструкція має ділянки, в яких твердий діелектрик межує з газовим, зокрема з атмосферою. На цій межі розряд може проходити в самому твердому діелектрику або в газовому шарі, який прилягає до твердого діелектрика. У цьому параграфі розглядається вплив твердого діелектрика на розряд в газі.

Поверхневий газовий розряд зберігає всі властивості газового розряду, про які розповідалось раніше. Розряд по поверхні твердого діелектрика має в той же час цілу низку особливостей, пов'язаних із впливом твердого діелектрика на структуру поля і протікання розряду. Як правило, введення у повітряний проміжок поверхні твердого діелектрика приводить до зниження розрядної напруги.

У більшості ізоляційних конструкцій поверхневий газовий розряд протікає в різко нерівномірному полі. Типові ізоляційні конструкції з таким полем наведені на рис. 2.8.

У найбільш загальному вигляді процес розряду протікає таким чином. При поступовому підвищенні підведеної напруги спочатку одночасно по всьому периметру електродів виникає



корона, потім у приелектродній зоні в тонкому шарі повітря, що безпосередньо прилягає до діелектрика, починають розвиватись стримери у вигляді тонких світлових ниток. Поступово стримерів стає все більше, довжина їх збільшується. Нарешті виникає лідер, який своїм каналом завершує пробій проміжку. Між електродами по поверхні ізолятора пливе іскра або утворюється дуга, тому такий розряд називається ковзним. У процесі утворення стримерів поверхня діелектрика заряджається, тому що заряди переміщуються по поверхні і частково осідають на діелектрику. Нагромаджені на поверхні іони утворюють об'ємний заряд, який спотворює поле проміжку, послабляючи його поблизу електродів, від цього розряд затухає. При промисловій частоті на початку півперіоду (коли напруга зростає дуже швидко) об'ємний заряд не встигає накопичуватись, і тому ковзний розряд виникає саме в цю частину півперіоду.

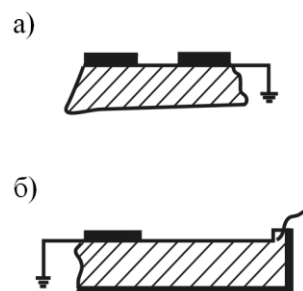


Рис. 2.8. Характерні системи електродів:  
а – опорний ізолятор; б – прохідний ізолятор

Переміщення іонів викликає виділення тепла, теплові процеси сприяють утворенню стримерів, тому не можна допускати появи ковзних розрядів. Тим більше, що розряд супроводжується короткохвильовим випромінюванням, що несприятливо впливає на ряд діелектриків, особливо органічних. При розряді, наприклад, у повітрі, у результаті іонізаційних процесів виникають оксиди азоту й озону, які являють собою хімічно активні речовини і руйнують як металеві конструкції, так і діелектрики.

Особливості розвитку ковзних розрядів детально досліджені, встановлені фактори, які впливають на величину пробивної напруги, і розроблені заходи щодо її збільшення. Напруга пробою ковзного розряду або практично така ж, як для повітря, або менша. Вона залежить від матеріалу ізолятора, стану його поверхні, будови електричного поля. Ці фактори враховуються уже при проектуванні ізоляції, однак другий із них (стан поверхні діелектрика) дуже змінюється у процесі експлуатації. У результаті виходить, що напруга пробою по поверхні діелектрика значно знижується.

Основною якістю матеріалу діелектрика, який визначає величину пробивної напруги, є гігроскопічність. Якщо поверхня діелектрика погано зволожується (парафін), то величина розрядної напруги наближається до пробивної для повітря в рівномірному полі. Однак на величину напруги розряду впливає не стільки природа діелектрика, скільки стан його поверхні, відсутність вологи і бруду. При зволоженні і забрудненні діелектрика створюється можливість переміщення іонів до електродів і утворення біля них об'ємного заряду (у шарі вологи), як у різконеоднорідному полі. Наявність такого заряду приводить до ще більшого спотворення картини поля і прискорення розряду. Струми витоку, що протікають по поверхні, підсушують діелектрик нерівномірно, що також сприяє нерівномірному розподілу напруженості і зниженню розрядної напруги.

Починається розряд звичайно (навіть при сухому, чистому діелектрику в однорідному полі) в дуже малих проміжках – щілинах між електродом і діелектриком, повітряних включеннях. Це відбувається тому, що в них створюється велика напруженість поля (діелектрична проникність повітря значно менша, ніж діелектрика). Ці розряди стають осередками загального розряду проміжку і значно знижують пробивну напругу, яка залежить також від напрямку вектора напруженості електричного поля до поверхні діелектрика, тобто від величини тангенціальної і нормальної складових.

Тангенціальна складова напруженості електричного поля переважає в проміжках для опорних ізоляторів (рис. 2.8, а). Дія цієї складової подібна дії усієї напруженості в однорідному полі, тому тут абсолютна величина пониження пробивної напруги

дещо менша, ніж у випадку однорідного поля. Зменшити концентрацію магнітних силових ліній у електрода можна збільшенням його розмірів і застосуванням внутрішнього екрана.

Нормальна складова напруженості, характерна для прохідних ізоляторів (рис. 2.8, б), притискає іони до поверхні діелектрика, вони постійно бомбардують діелектрик і цим викликають його нагрівання, а отже, і термічну іонізацію. Тому наявність нормальної складової напруженості сприяє значному пониженню розрядної напруги.

Для збільшення розрядної напруги по поверхні діелектриків вживають такі практичні заходи:

- застосовують внутрішній екран в ізоляторі;
- збільшують шлях розряду за допомогою ребер на ізоляторах;
- зменшують гігроскопічність шляхом глазурування поверхні;
- періодично провадять огляди і чищення ізоляції електроустановок.

### **Контрольні питання**

1. Які параметри стандартного повного грозового імпульсу?
2. Що таке фронт хвилі?
3. Що таке вольт-секундна характеристика?
4. Дайте визначення коронного розряду.
5. Чому коронний розряд суттєво впливає на роботу електротехнічного обладнання?
6. Дайте характеристику коронного розряду при постійній напрузі.
7. Перелічіть заходи, що зменшують втрати на корону.
8. Назвіть особливості розвитку розряду по поверхні твердих діелектриків.
9. Які заходи вживають для збільшення розрядної напруги по поверхні діелектриків?

## Розділ 3

# ІЗОЛЯТОРИ ВИСОКОЇ НАПРУГИ

### 3.1. Характеристики ізоляторів

Струмівідні частини електричних установок, що знаходяться під різними потенціалами, повинні бути надійно закріплені і ізольовані від заземлених частин та одна від одної. Здійснюється це за допомогою різного роду ізоляторів.

За призначенням ізолятори бувають: лінійні та станційно-апаратні. Лінійні ізолятори застосовуються для ізоляції та кріплення проводів ЛЕП; станційно-апаратні – для ізоляції та кріплення шин і струмопроводів в розподільних устаткуваннях електричних станцій і підстанцій.

Матеріал і конструктивне виконання ізолятора повинні забезпечити його роботу на протязі тривалого часу, в умовах дії механічних навантажень, вібрацій, різких змін температури, забруднень, а ізолятори, призначені для роботи у зовнішніх установках, – в умовах дощу, туманів і т. ін.

До теперішнього часу найбільш вживаним матеріалом для виготовлення ізоляторів є електротехнічний фарфор. З інших діелектричних матеріалів застосовується загартоване скло, яке за своїми механічними, електричними характеристиками і вартістю не поступається фарфору і придатне для виготовлення лінійних ізоляторів. Скло розтріскується при пошкодженнях, що полегшує виявлення дефектних ізоляторів при їх виготовленні та на лініях.

Апаратні ізолятори виготовляються також з епоксидних смол. В прохідних ізоляторах використовується паперово-масляна та маслбар'ерна ізоляція. Опорні і прохідні ізолятори виготовляються іноді з бакелізованого паперу, який при відповідній термічній обробці набуває порівняно високих електричних і механічних властивостей.

В останній час в контактних мережах змінного і постійного струму знайшли застосування полімерні ізолятори. Основними елементами таких ізоляторів є стержень із

односпрямованого склопластика, захисна полімерна оболонка і металеві кінцівки.

Утрата ізолятором ізолюючих властивостей може відбутися за рахунок пробою твердого ізолюючого матеріалу або при дуговому перекритті по його поверхні. У першому випадку ізолятор стає непридатним до роботи, у другому – його електрична міцність частіше всього відновлюється після ліквідації дуги. Тому ізолятори конструюють таким чином, щоб найбільша розрядна напруга по поверхні була на 40-60 % меншою, ніж напруга пробою товщі діелектрика.

Напруга перекриття по поверхні ізолятора в значній мірі залежить від умов його роботи. Для ізоляторів, призначених для встановлення в приміщеннях, основною електричною характеристикою є сухорозрядна напруга перекриття ( $U_{с.р.}$ ).

Визначається  $U_{с.р.}$  при промисловій частоті і сухій та чистій поверхні ізолятора як мінімальна напруга, при якій відбувається перекриття ізолятора. Величина сухорозрядної напруги визначається розрядною відстанню, тобто найкоротшою відстанню в повітрі між електродами ізолятора.

Важливою характеристикою ізоляторів, що встановлені у зовнішніх установках, є мокророзрядна напруга. Вона визначається також при промисловій частоті як мінімальна напруга перекриття при дії рівномірних водяних струменів, що падають під кутом  $45^\circ$  на поверхню ізолятора. Мокророзрядна напруга завжди менша сухорозрядної.

Пробивною називають найменшу напругу промислової частоти, при якій відбувається електричний пробій матеріалу ізолятора.

Поведінка ізоляторів при дії атмосферних перенапруг визначається вольт-секундною характеристикою. Однак на практиці оцінку імпульсної міцності ізолятора проводять за величиною імпульсної розрядної напруги, під котрою розуміють 50%-ну розрядну напругу при випробуваннях повною і зрізаною хвилями.

Щоб забезпечити високі значення розрядних напруг при відносно невеликих габаритах, ізолятори виконують з розвиненими поверхнями, тобто з ребрами або острижками. Їх

кількість, форма і розміри – основні конструктивні параметри ізоляторів, від яких залежать їх експлуатаційні характеристики.

Розвинені поверхні ізоляторів збільшують довжину витоку, від якої найбільше залежить розрядна напруга під час дощу або при забрудненнях. Крім того, при деяких видах опадів нижні поверхні ребер змочуються в меншому ступені і це значно збільшує повний опір витоку. Якщо правильно вибрані розміри і форма ребер, то розряд, що розвивається вздовж ізолятора, відривається від його поверхні. В цьому випадку ділянки вздовж поверхні ізолятора чергуються з суто повітряними проміжками і розрядна напруга виявляється більш високою.

Крім того, наявність ребер примушує розряд розвиватися під кутом до силових ліній поля, тобто по шляху з меншою напруженістю.

Від форми ізолятора в значній мірі залежить інтенсивність його забруднення в умовах експлуатації. Це пов'язано з тим, що відкладення забруднень здійснюється під час вітру і їх кількість на одиницю площі прямо пропорційна градієнту швидкості потоку повітря у поверхні. При ускладненні форми ізолятора біля нього можуть виникати вихри в потоці повітря і відповідно зростати інтенсивність забруднення. Крім того, форма ізолятора впливає на ефективність самоочищення поверхонь при дощі та вітрі. При виборі ізоляторів враховують всі ці міркування, а також вимоги, пов'язані зі зручністю масового виробництва.

Механічна міцність ізоляторів вибирається відповідно до умов їх роботи. Для лінійних підвісних ізоляторів нормується міцність на розтягування, для опорних і прохідних – міцність на згин. Для більшості типів ізоляторів основною механічною характеристикою є мінімальне руйнівне навантаження, що спричиняє повне або часткове руйнування ізолятора. Величина механічного навантаження при порушенні електричної міцності ізолятора називається електромеханічною міцністю ізолятора.

Механічні характеристики ізоляторів, як і електричні, регламентовані стандартами.

### 3.2. Лінійні ізолятори

Лінійні ізолятори за конструкцією поділяються на два типи: штирові і підвісні.

Штирові ізолятори застосовуються, як правило, на лініях напругою до 10 кВ, іноді – на лініях напругою 20-35 кВ. На рисунку 3.1, м, н наведені типові конструкції таких ізоляторів. Ізолятор накручується на металевий штир, за допомогою якого він кріпиться на траверсі опори. Провід закріплюється за допомогою дротової в'язки або спеціальних затискачів у верхній канавці або на шийці ізолятора.

Основні характеристики штирових ізоляторів наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Характеристики штирових ізоляторів

Тип ізолятора	Розміри, мм		Механічна міцність на згин, кг	Сухо-розрядна напруга, кВ	Мокро-розрядна напруга, кВ	Імпульсна розрядна напруга, кВ	
	висота	діаметр				при 2 мкс	50%-на
ШС-6	94	126	1400	50	28	109	83
ШС-10	110	147	1400	60	34	130	101
ШС-19 (скляні)	110	150	1800	60	36	-	-
ШД-20	190	185	3500	68	64	170	132

Підвісні ізолятори застосовуються двох типів: тарілчасті і стержневі.

Тарілчастий ізолятор (рис. 3.1, а) являє собою фарфорове або скляне тіло, армоване зверху металевою шапкою, а знизу металевим стержнем. Характеристики підвісних ізоляторів наведені в табл. 3.2.

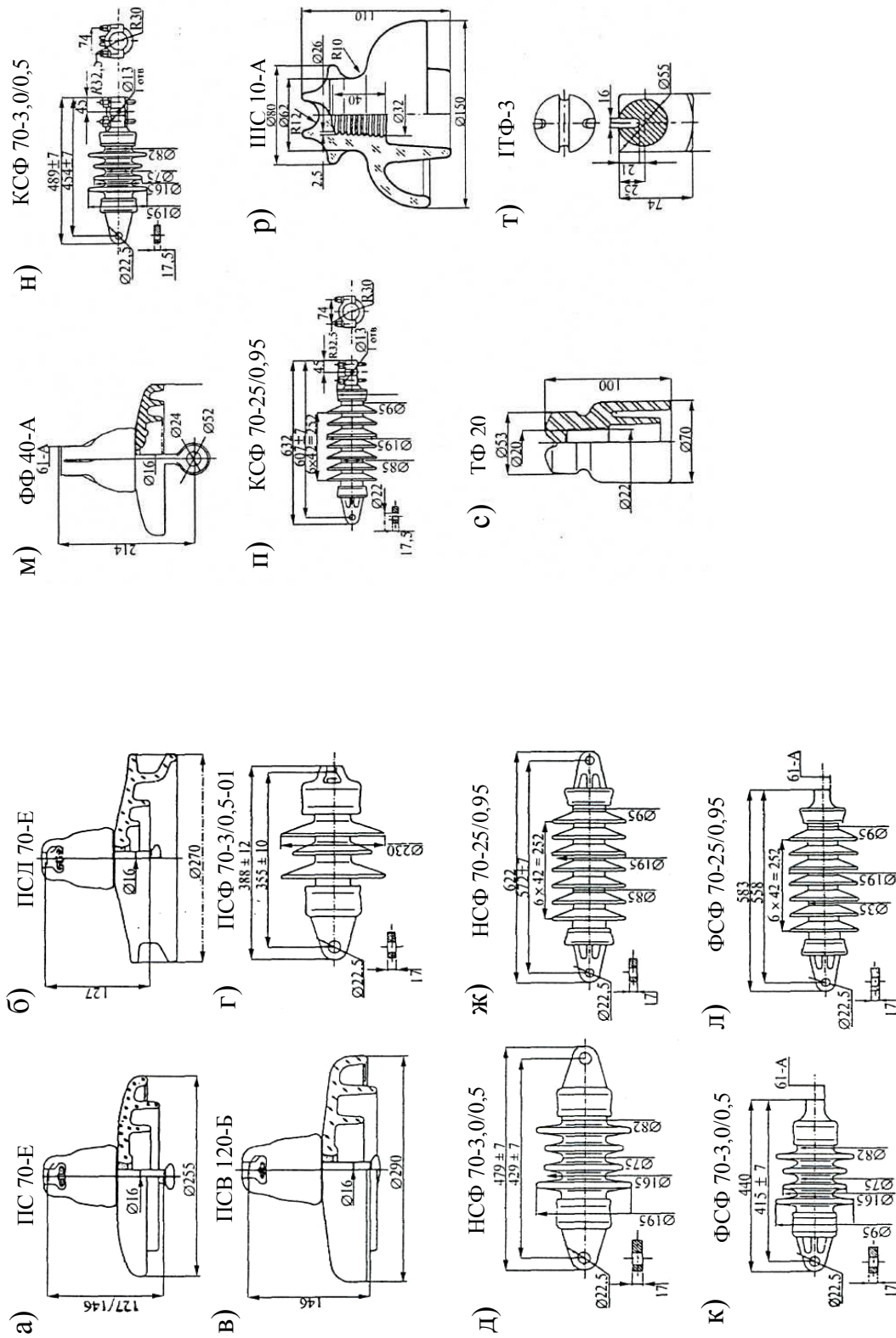


Рис. 3.1 Конструкція серійних ізоляторів: скляні підвісні-тарілчасті під лестик (а), брудостійкі (б), із збільшеними ребрами (в); фарфорові стержневі-підвісні на 3 кВ (г), натяжні на 3 (д) і 25 кВ (ж); фіксаторні тарілчасті (м) і стержневі на 3 (к) і 25 кВ (л); консольні стержневі на 3 (и) і 25 кВ (п); штирові 10 (р) і 0,4 кВ (с); орішкові 0,4 кВ (т)



## Характеристики підвісних лінійних ізоляторів

Тип ізолятора	Розміри, мм		Вага, кг	Ефективна довжина шляху витoku, см	Мокророзрядна напруженість в гірлянді, кВ/см
	висота	діаметр			
П-4,5	170	270	6,4	25	2,95
П-11	21,5	350	14,2	34	2,95
ПС-4,5	130	255	4,0	25	3,7
СТ- 110/4,5	1270	75	23,0	185	3,6

Стержневі підвісні ізолятори (рис. 3.1, г) являють собою суцільний фарфоровий стержень з ребрами, армований зверху і знизу металевими шапками з конічними внутрішніми поверхнями. При їх використанні досягається значна економія металу.

Основний недолік стержневих ізоляторів – обрив проводу при руйнуванні ізолятора електричною дугою або механічному діянні. Тарілчасті ж ізолятори, навіть під час електричного пробою, як правило, здатні нести механічне навантаження. Основні характеристики стержневого ізолятора СТ-110 наведені в табл. 3.2.

Для ізоляції ЛЕП напругою 6-20 кВ достатньо одного підвісного ізолятора. Для ізоляції ліній напругою 35кВ і вище підвісні ізолятори збирають у гірлянди. Гірлянди підвішені вертикально на проміжних опорах, навантажені вагою проводів та можливими на них опадами, і називаються підтримувальними. Гірлянди на анкерних, кутових і кінцевих опорах розташовані близько до горизонталі через великі повздовжні зусилля натягнених проводів і називаються натяжними.

Кількість ізоляторів у гірлянді визначається типом ізолятора, номінальною напругою лінії, матеріалом опори і розташуванням гірлянди. В натяжних гірляндах кількість ізоляторів береться на один більше, ніж в підтримувальних, оскільки натяжні гірлянди зазнають більших механічних навантажень і ймовірність пошкодження ізоляторів у цих гірляндах вища. Кількість ізоляторів у гірляндах для ліній різних класів напруги наведена в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

## Кількість ізоляторів у гірляндах

Номінальна напруга, кВ	Тип опор	Кількість ізоляторів типу П-4,5 в гірлянді	
		підтримувальна	натяжна
35	металеві	3-4	4-5
35	дерев'яні	2	3
110	–	6	7
110	металеві	7	8
150	–	11	12
220	–	14	16
330	–	16	–

Як видно з таблиці, на дерев'яних опорах кількість ізоляторів у гірлянді на один менша, ніж на металевих, оскільки деревина працює як додаткова ізоляція в умовах імпульсних діянь.

### 3.3. Станційно-апаратні ізолятори

До ізоляції розподільних устаткувань ставляться вимоги високої надійності, оскільки пробій ізоляції на підстанціях може привести до тяжкої аварії.

Станційно-апаратні ізолятори за своїм призначенням і конструкцією поділяються на опорні та прохідні. Опорні ізолятори призначені для кріплення струмовідних шин, прохідні ізолятори встановлюють в місцях, де частини, що знаходяться під напругою, проходять крізь стіни, перекриття або огороження, а також для введення напруги усередину металевих баків трансформаторів, конденсаторів, вимикачів і інших апаратів.

Основним ізолюючим матеріалом опорних ізоляторів є фарфор. В прохідних ізоляторах напругою 35 кВ і вище, крім фарфору, широко використовується паперово-масляна і маслобар'ерна ізоляція.

Опорні ізолятори для внутрішнього встановлення напругою 3-35 кВ виконуються, як правило, стержневого типу і складаються з фарфорового тіла і металевої арматури.

Найпростішу форму мають ізолятори стержневого типу для закритих розподільних устаткувань. Ізолятор (рис. 3.2, а) являє собою порожнисте фарфорове тіло. Верхня частина ізолятора виконана суцільною для запобігання розрядів у внутрішній порожнині. Фарфор за допомогою цементу армований понизу чавунним фланцем, а поверху чавунною шапкою.

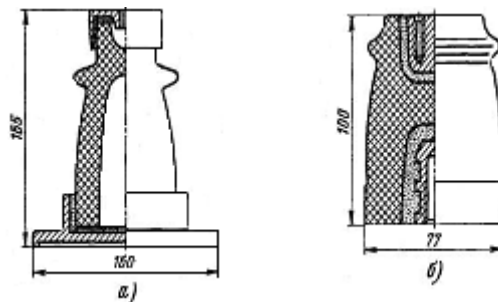


Рис. 3.2. Опорні стержневі ізолятори типу ОФ для внутрішнього встановлення на напругу 6 кВ: а – без внутрішнього екрана; б – з внутрішнім заправленням арматури

Покращення розрядних характеристик досягають за допомогою внутрішнього екрана, який встановлюють на деяких ізоляторах. Роль такого екрана в опорних ізоляторах можуть виконувати металеві елементи внутрішньої заправки арматури. Ізолятори такої конструкції мають менші розміри і масу.

У позначенні ізоляторів наводять їх тип і матеріал, номінальну напругу і механічну міцність. Наприклад, ОФ–35–750 – опорний фарфоровий на 35 кВ, механічна міцність 7,5 кН.

Стержневі опорні ізолятори для зовнішнього встановлення відрізняються дуже розвиненою поверхнею. На напругу 35 – 110 кВ такі ізолятори виготовляють як суцільний фарфоровий стержень з рівномірно розташованими ребрами (рис. 3.3). Позначення, наприклад ОНС – 110 – 1000, означає таке: опорний, зовнішнього встановлення, стержневий на 110 кВ з механічною міцністю 10 кН.

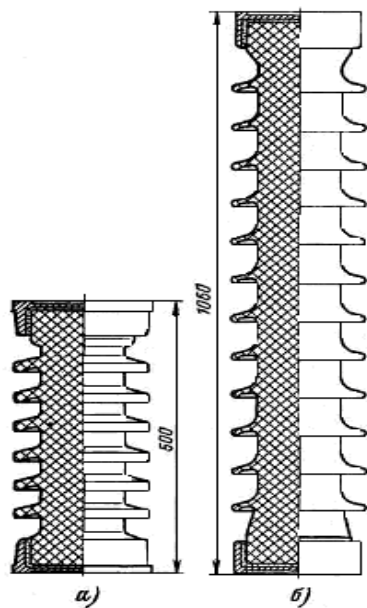


Рис. 3.3. Опорні стержневі ізолятори типу ОНС для зовнішнього встановлення: а – на 35 кВ; б – на 110 кВ

Опорні штирові ізолятори типу ШН, ШТ, ШД виготовляються на напругу 6-35 кВ і складаються з одної, двох або трьох фарфорових частин, скріплених за допомогою цементу одна з одною і з арматурою у вигляді ковпака і штиря з фланцем. Їх особливістю є застосування сталевго штиря, що приймає на себе основну частину зусилля згину. Це підвищує міцність штирових ізоляторів, що важливо при великих струмах к.з.

На рис. 3.4 наведений опорний штировий ізолятор ОНШ – 10 – 500 зовнішнього встановлення на напругу 10 кВ з мінімальним руйнівним навантаженням на згин 5 кН.

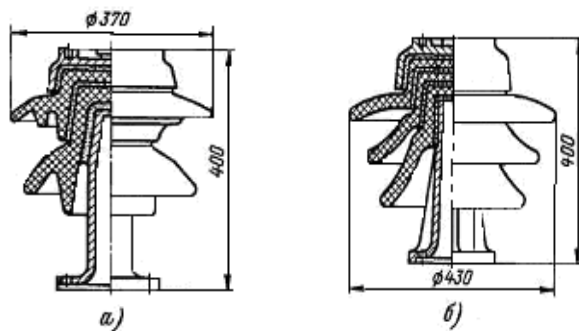


Рис. 3.4. Опорні штирові ізолятори типу ОНШ на напругу 35 кВ:  
а – руйнівне навантаження на згин 10 кН;  
б – руйнівне навантаження на згин 20 кН

В установках на напругу 110 кВ і вище використовуються колонки, що складаються із декількох опорно-штирових ізоляторів, встановлених один на один.

Поодинокі колонки з трьох-п'яти ізоляторів застосовують в установках напругою до 220 кВ. При більш високих напругах використовують опорні ізолятори, що мають вигляд триніжки, яка складається з декількох колонок.

Основні характеристики опорних ізоляторів наведені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Основні характеристики опорних ізоляторів

Тип ізолятора	Клас напруги, кВ	Висота, мм	Найбільший діаметр фарфору, мм	Розрядна напруга, кВ		50%-на імпульсна напруга, кВ
				сухорозрядна	мокророзрядна	
ОА-6	6	165	86	50	-	62
ОВ-10	10	225	130	63	-	105
ОМА-6	6	100	77	50	-	-
ОМА-10	10	120	82	57	-	-
ШН-10	10	188	160	73	36	98
ШТ-35	35	400	370	135	85	205
ШД-35	35	400	430	145	88	230
СТ-110	110	1030	180	330	240	500
3*ШТ-35	110	1200	370	330	240	575
5-ШД-35	220	2000	430	610	460	930

Прохідні ізолятори на напругу 6-35 кВ виготовляються частіше за все фарфоровими. Конструктивне їх виконання визначається величиною напруги, струму, допустимого механічного навантаження на згин та навколишнім середовищем.

Типові конструкції прохідних ізоляторів на напругу 6 і 35 кВ для внутрішнього та зовнішнього встановлення наведені на рис. 3.5. Вони складаються з ізоляційного фарфорового тіла, струмовідного стержня і фланця, за допомогою якого ізолятор кріпиться на стіні, перекритті або огороженні.

В прохідних ізоляторах на напругу 35 кВ струмовідний стержень покривають шаром бакелізованого паперу товщиною

3 - 6 мм. Це збільшує напругу виникнення корони приблизно в 2 рази і сприяє підвищенню розрядної напруги. Суттєво збільшують розрядну напругу ребра, особливо ті, що розташовані поблизу фланця.

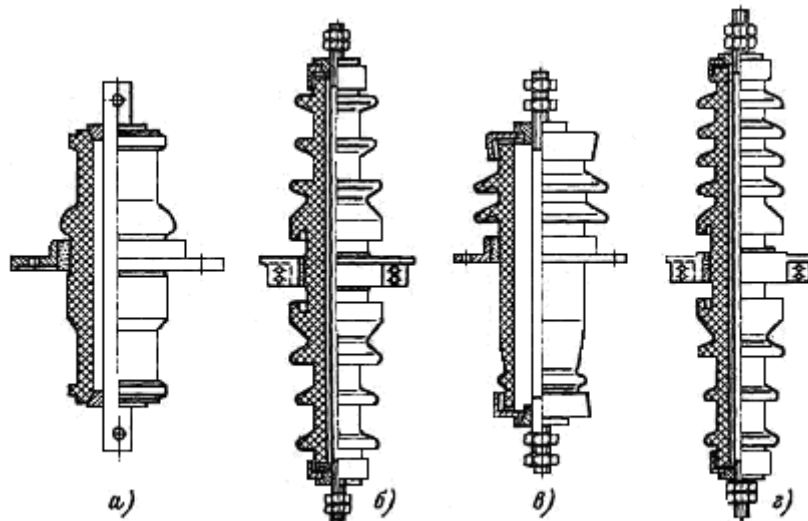


Рис. 3.5. Прохідні ізолятори: а, б – типу П для внутрішнього встановлення; в і г – типу ПН для зовнішнього встановлення

Прохідні ізолятори для зовнішнього встановлення відрізняються більш розвиненою поверхнею тієї частини ізолятора, яка розташована зовні приміщення.

В позначенні прохідних ізоляторів, крім номінальної напруги і мінімального руйнівного навантаження на згин, наводиться номінальний струм. Наприклад, ізолятор зовнішнього встановлення на напругу 10 кВ, 400 А і 7,5 кН позначається: П – 10/400 – 750.

Прохідні ізолятори на більш високі напруги (вводи) мають значно складнішу конструкцію. Висока напруженість в ізоляційному проміжку між струмовідним стержнем та фарфоровими втулками ізолятора змушує заповнювати його маслом. На струмовідний стержень накладені шари паперу з провідними накладками між ними. Розміри шарів і прокладок вибираються такими, щоб забезпечити рівномірний розподіл потенціалів як в радіальному, так і в поздовжньому напрямку вводу. Фарфорові вставки захищають внутрішню ізоляцію від атмосферних дій і одночасно являють собою резервуар для масла,

що заповнює ввід. Нижня частина вводу, що розташована в баці апарату, виконується укороченою. Це пояснюється більш високою розрядною напругою по поверхні фарфору в маслі проти розрядної напруги в повітрі.

Маслонаповнені вводи звичайно герметизовані. Для компенсації температурних змін в маслі передбачені компенсатори тиску, вбудовані в верхню частину вводу, а також вимірювальні пристрої для контролю тиску.

### **3.4. Ізолюючі елементи в контактних мережах**

До ізолюючих елементів у контактних мережах, крім ізоляторів, відносяться також ізолюючі елементи секційних ізоляторів контактної мережі і опорні елементи розрядників і роз'єднувачів.

Їх класифікують: за конструкцією – тарілчасті (рис. 3.1, а, б, в), стержневі (рис. 3.1, г, д, ж), вставки, втулки, ковзуни, опорні, штирові, орішкові (рис. 3.1, т), сідлоподібні; за напрямком прикладення навантажень і місцем встановлення – підвісні, натяжні, фіксаторні (рис. 3.1, к, л, м), консольні (рис. 3.1, н, п), штирові (рис. 3.1, р, с); за матеріалом – скляні, фарфорові, полімерні, з дельтадеревини; за напругою – 1, 3, 10, 20, 25, і 35 кВ і т. ін.

Орішкові ізолятори (рис. 3.1, т) призначені для встановлення в струнах контактної підвіски, хвилеводах, відтяжок щогл, антен і розраховані на незначні електричні напруги. Конструкція ізолятора являє собою об'ємний еліпс з двома перпендикулярно розташованими наскрізними отворами для проходження проводів, що ізолюють. Таким чином, фарфор орішкових ізоляторів працює на стиснення.

Сідлоподібні ізолятори призначені для роботи на розтягнення при більш високих напругах, ніж у орішкових, наприклад, в двопровідних і трипровідних секційних ізоляторах. Їх конструкція аналогічна конструкції орішкових, але доповнена фарфоровими „юбками”, що забезпечують збільшення діелектричної міцності.

Ізолюючі втулки встановлюють на опорах контактної мережі як ізолюючі елементи між опорою і закладними деталями із закріпленими на них консолями, металевими кронштейнами, а також між анкерними болтами фундаментів і фланцями стійок опор.

Ізолюючі прокладки призначені для ізоляції хомутів кріплення металевих консолей і кронштейнів від поверхні залізобетонної стійки опори. Як і втулки, виготовляються з поліетилену.

Ізолюючі ковпачки і шайби застосовуються у вузлах ізоляції фундаментів опор в системі контактної мережі. Виготовляють їх також з поліетилену або склотекстоліту.

Тарілчасті підвісні ізолятори з'єднують в підтримувальні або натяжні гірлянди: по два на лініях контактної мережі постійного струму і по три – п'ять (в залежності від умов забруднення повітря) – змінного.

Натяжні гірлянди ізоляторів встановлюють у вузлах анкерівки контактних проводів, проводів ПЛ, в несучих тросах контактної мережі над секційними ізоляторами, у фіксуючих тросах гнучких і жорстких поперечок.

На електрифікованих залізницях експлуатуються тарілчасті підвісні скляні ізолятори нормального виконання ( ПС70 – Е, ПСВ120 – Б) і брудостійкі (ПСД70 – Е, ПСВ120 – Б), а також ізолятори марок ПСС70 – А, ПСС70 – Б, ПС70 – Д, ПФ70 – А, ПФ70 – Д, ПФ70 – Ж, ПТФ70, ПТФ70 – 3,3/5, СФ70 – А, ПФС70 – А, ПСС120 – Б, ПСА120 – А, ССА120 – А.

Перша буква умовного позначення тарілчастого ізолятора визначає його призначення : П – підвісний, друга буква – матеріал ізоляційної деталі: С – скло, Ф – фарфор; третя буква – конфігурацію тарілки: В – з витягнутим ребром, Д – двокрила, С – кульова, А – антивандальна; цифри показують клас ізолятора; буква після цифри – модифікація ізолятора. Частина підвісних тарілчастих ізоляторів має позначення з першою буквою С, що означає вид з'єднання типу «серга». Приклад умовного позначення ізолятора підвісного тарілчастого скляного з витягнутим ребром класу 120 кН, модифікації Б: ПСВ120 –Б .

В контактній підвісці змінного струму консольні фарфорові і полімерні стержневі ізолятори встановлюють в підкосах



ізолюваних консолей (рис. 3.1, п). Вони мають підвищену механічну міцність. Їх також застосовують в пристроях ізоляції рогових розрядників.

В експлуатації знаходяться стержневі фарфорові ізолятори підвісного (ПСФ) (рис. 3.1, г), натяжного (НСФ) (рис. 3.1, д, ж), консольного (КСФ) (рис. 3.1 н, п) і фіксаторного (ФСФ) (рис. 3.1, к, л) виконання.

Полімерні ізолятори за призначенням поділяють на підвісні, натяжні (рис. 3.6, а-д, л, м), консольні (рис. 3.6, к) і фіксаторні (рис. 3.6, ж).

Для врізання в проводи контактної підвіски розроблені різні полімерні стержневі ізолятори.

Серійно випускаються ізолятори: НСК120 – 3/0,6 (рис. 3.6, а), НСК120 – 25/1,2 (рис. 3.6, б), НСКр120 – 3/0,6 (рис. 3.6, в), НСФт120 – 3/0,6 (рис. 3.6, г), НСФт120 – 3/0,8, ФСК120 – 3/0,6 (рис. 3.6, ж), КСК120 – 6-3/0,6 (рис. 3.6, к), ЕСФт70 – 3/0,6 (рис. 3.6, л), ЭСФт70 – 25/1,0 (рис. 3.6, м). Перша буква умовного позначення ізолятора визначає його призначення: Н – натяжний, Ф – фіксаторний, К – консольний, Е – елемент ізолюючий; друга буква – конструктивне виконання: С – стержневий; третя буква – матеріал і конфігурація захисної оболонки: К – гладка із кремнійорганічної гуми, Фт – гладка із фторопласту; перше число – клас ізолятора; друге число – номінальна напруга контактної мережі, кВ, або нормована руйнівна сила на згин, кН; третє число – довжина шляху витoku струму, м.

Приклад умовного позначення полімерного натяжного стержневого ізолятора з гладкою оболонкою із фторопласту класу 120кН, на номінальну напругу 25 кВ із довжиною шляху струму витoku 1,2 м: НСФт 120 - 25/1,2.

Основні характеристики деяких типів ізоляторів наведені в табл. 3.5.

Полімерні ізолятори міцніше, надійніше і легше фарфорових та скляних, однак значно дорожче і потребують спеціальних заходів захисту.



Таблиця 3.5

## Основні характеристики деяких типів ізоляторів

Тип	Н, мм	D,мм	l <sub>вит</sub> ,мм	U <sub>с.р.</sub> ,кВ	U <sub>м.р.</sub> ,кВ	Руйнівна сила, кН		
						розтяг	стиск	згин
Тарілчасті фарфорові								
ПФ-70А	146	255	303	70	40	70	-	-
ПФГ-60Б	125	270	375	70	40	60	-	-
Полімерні ребристі з кремнійорганічної гуми								
НСК- 120/27,5	350	115	950	140	100	120	-	-
ФСК-70/0,9	540	150	950	140	100	70	-	4
ОСК-70/0,9	440	150	950	140	100	70	200	5
Склопластиковий стержень, покритий фторопластовою захисною оболонкою								
НСФ <sub>т</sub> - 120/1,2	1514	14	1200	-	215	90	-	-

**Контрольні питання**

1. Сформулюйте призначення ізоляторів.
2. Наведіть класифікацію ізоляторів.
3. З яких матеріалів виготовляють ізолятори?
4. Назвіть основні характеристики ізоляторів.
5. За допомогою яких конструктивних особливостей забезпечуються високі значення розрядних напруг в ізоляторах?
6. Опишіть конструктивні особливості окремих ізоляторів контактної мережі і тягових підстанцій.
7. Назвіть кількість ізоляторів у гірлянді на напругу 110 кВ.
8. Перелічіть переваги і недоліки полімерних ізоляторів.

## Розділ 4

# КОНТРОЛЬ ВНУТРІШНЬОЇ ІЗОЛЯЦІЇ

### 4.1. Особливості внутрішньої ізоляції

Поняття внутрішньої ізоляції об'єднує різні за будовою, габаритами, виконуваними функціями, за механічними та електричними характеристиками ізоляційні конструкції (електричні машини, апарати, ізолятори і т.д.).

Однак фізичний зміст і закономірність процесів, від яких залежить поведінка в експлуатації внутрішньої ізоляції, є багато в чому загальними. У силу цього для дослідження і випробовування внутрішньої ізоляції різного високовольтного обладнання застосовують однакові методи і вимірювальні засоби.

Внутрішня ізоляція має ряд особливостей, які суттєво відрізняють її від зовнішньої ізоляції.

Перша особливість полягає в тому, що на електричну міцність внутрішньої ізоляції практично не впливають короточасні зміни атмосферних умов, якщо тільки ці зміни не виходять за межі припустимих. Пояснюється це тим, що при короточасних коливаннях температури, тиску і вологості навколишнього повітря властивості твердих і рідких діелектриків, а також газів, що містяться в закритих посудинах, змінюються незначно або взагалі не змінюються.

Для зовнішньої ізоляції будь-яка зміна атмосферних умов означає зміну стану основного діелектрика, тобто повітря, а тому негайно відбивається на розрядній напрузі.

На поведінку внутрішньої ізоляції помітно впливають лише середні значення температури і вологості навколишнього повітря за тривалі проміжки часу, сумірні зі строком служби ізоляції.

Інша особливість характерна для багатьох розповсюджених видів внутрішньої ізоляції, які містять тверді діелектрики, і полягає в тому, що пробій останніх являє собою необоротне зруйнування. Для такої ізоляції неможливе самовідновлення електричної міцності до вихідного рівня після вимикання джерела напруги. Після пробою неминучі тривалий капітальний ремонт чи заміна ізоляції, а іноді й усього апарату. Тому внутрішня ізоляція повинна мати більші запаси міцності, ніж зовнішня.

**Характеристика рідких діелектриків.** Рідкі діелектрики широко використовують в трансформаторах, вимикачах, паперово-масляних конденсаторах, кабелях і т. ін. Вони мають більш високу електричну міцність у порівнянні з газовою ізоляцією, що дозволяє зменшити габарити ізолюючих конструкцій. Створенню компактних конструкцій сприяє і те, що рідина має високу теплоємність і забезпечує добрий тепловідвід.

Найчастіше використовують нафтові ізоляційні масла, а саме – трансформаторне масло.

Чисті ізоляційні рідини містять тверді, рідкі та газоподібні домішки, які великою мірою визначають електричні властивості рідких діелектриків.

Механізм пробою рідких діелектриків подібний до пробою газів. Під дією прикладеної напруги виникає емісія електронів з катода і збільшення їх кількості внаслідок ударної іонізації. Так розвивається самостійний розряд. Рідкі діелектрики завжди містять розчинений газ, який під дією прикладеної напруги збирається у бульбашки. Тому шлях розряду в рідині включає не тільки рідку, але й газоподібну фазу, що сприяє розвитку розряду.

Електрична міцність рідких діелектриків різко знижується при різних забрудненнях і особливо при зволоженні. Частинки бруду під дією електричного поля вишикуються у ланки, спрямовані вздовж силових ліній. При перекритті вздовж таких ланок розрядна напруга різко знижується.

Волога просочує волокна, тим самим утворюючи ланки, що різко знижують пробивну напругу.

Пробивна напруга рідких діелектриків характеризується значним розкидом відносно середніх значень. Це пов'язано з хаотичним характером вишикування частинок домішок в ланки.

Крива розподілу  $E_{пр}$  біля середнього значення відповідає нормальному закону. Чим більше домішків, тим більше розкид.

Оскільки домішки можуть знаходитись в різних кількостях і сполученнях, то створити єдину теорію пробою рідких діелектриків – задача складна.

Пробивна напруга масляного проміжка залежить від форми поля. В однорідних полях вона вища, ніж в неоднорідних. Тому в конструкціях прагнуть вирівнювати поле закругленням виступів, кромки і т. ін.

Імпульсна міцність масляних проміжків значно вища, ніж при напрузі частотою 50 Гц. Це пояснюється тим, що процес деформації крапель і утворення ланок потребує часу.

Електрична міцність масла залежить від температури. При зростанні температури вона знижується.

**Тверді діелектрики.** При порівняно тривалій дії напруги на твердий діелектрик можливе значне зниження його пробивної напруги, пов'язане з виділенням тепла в його товщині. У цьому випадку пробій називається тепловим. Термін „тепловий пробій” не зовсім точний. Пробій завжди має електричну природу. Внаслідок нагріву температура твердого діелектрика досягає значень, при яких виникає електричний провідний канал – пробій. Його виникнення найбільш ймовірно в області найгіршого тепловідводу. Якщо тепловідвід хороший, то пробивна напруга становиться нескінченною, тобто тепловий пробій настати не може. Малоімовірний його розвиток і при короткочасній дії напруги. В цих умовах найімовірніший електричний пробій. Енергія вільних електронів зростає із збільшенням напруженості поля, виникають умови для іонізації і врешті настає пробій.

При багаторазовій дії імпульсів пробій твердого діелектрика можливий при меншій напрузі, ніж при одноразовій дії. Це явище називають кумулятивним ефектом.

**Маслобар'єрна і паперово-масляна ізоляція.** В силових трансформаторах, маслонеповнених вводах і т. ін. часто використовують ізоляцію, в якій масляні проміжки чередуються з твердими перегородками - бар'єрами. Застосування бар'єрів збільшує розрядну напругу в маслі. Технологічно ця ізоляція виконується шляхом намотування паперового кістяка і просочування його маслом. Це ізоляція вищої якості.

Оскільки електрична міцність масла нижче міцності паперу, то пробивна напруженість такої ізоляції визначається пробивною напруженістю масляних прошарків.

Для маслобар'єрної і паперово-масляної ізоляції характерний іонізаційний пробій: напруженість поля зростає насамперед в газових включеннях, під її впливом розвивається іонізація, яка в кінцевому рахунку приводить до пробою.

Іонізаційний пробій розвивається дуже повільно, в ньому яскраво виражений кумулятивний ефект. Характеристикою ізоляції стосовно іонізаційних явищ стає напруга іонізації, тобто така напруга, за якої виникає іонізація.

Підвищення напруги іонізації при змінній напрузі досягається реальним очищенням масла, застосуванням якісних волокнистих матеріалів та ін. При постійній напрузі процеси протікають інакше. Повторні пробої газових включень виникають рідко. Тому ізоляційні конструкції допускають більші робочі напруженості поля.

**Старіння ізоляції.** Цей термін використовується для позначення цілого ряду повільних процесів, що протікають в ізоляції під час її експлуатації. До них відносяться: зміна структури ізоляції під впливом високих температур, розвиток місцевих дефектів внаслідок іонізаційних процесів, поверхневих розрядів; зниження електричної міцності через зволоження, забруднення та інші грубі дефекти.

Зниження електричної міцності ізоляції внаслідок старіння проходить роками. Тому на практиці ізоляційні конструкції випробовуються на прискорене старіння шляхом дії більш високих температур і напруженостей поля.

При постійній напрузі іонізаційні явища є слабкими, однак виникає новий вид старіння ізоляції – хімічне старіння. Під дією постійної напруги в діелектрику виникають електролітичні явища, які приводять до хімічного переродження речовини діелектрика, зростання струмів провідності і в кінцевому рахунку – до пробою діелектрика. Ці процеси виникають в речовині з підвищеною іонною провідністю (скло, паперово-масляна ізоляція).

Найбільш інтенсивно йде процес старіння ізоляції під дією високих температур. Тому за температурним режимом ізоляції в експлуатації треба встановлювати особливий нагляд.

Старіння трансформаторного масла затримується додаванням спеціальних речовин, систематичним очищенням масла.

Внутрішня ізоляція будь-якого типу (крім суто газової) має специфічну залежність електричної міцності від часу діяння напруги. Залежність має п'ять характерних областей, показаних на рис. 4.1.

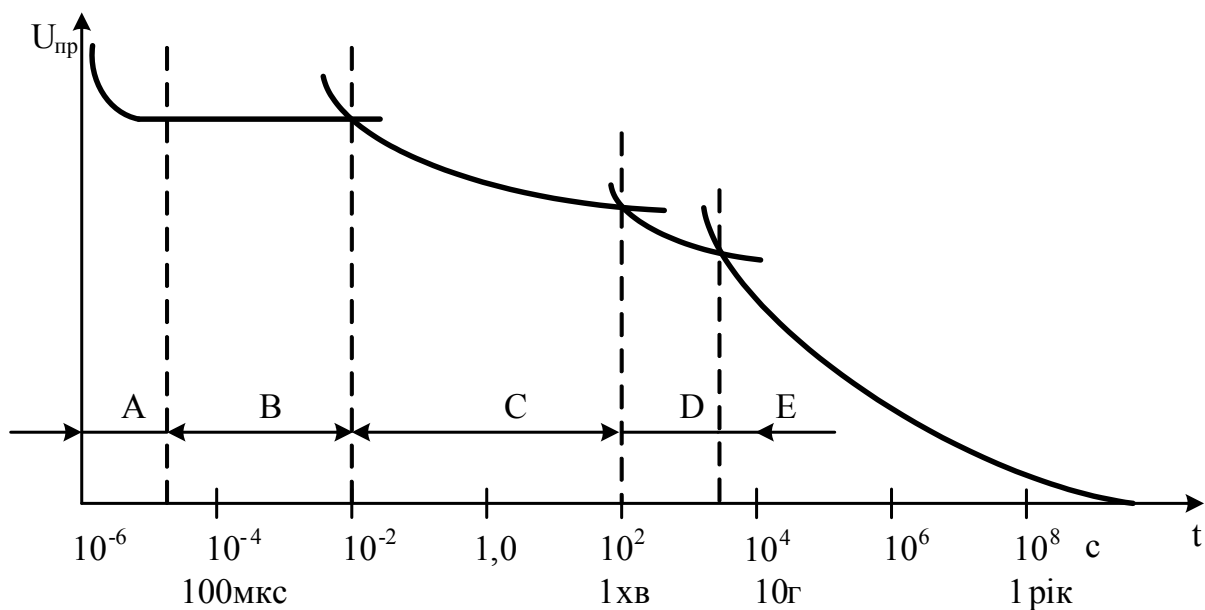


Рис. 4.1. Залежність пробивної напруги внутрішньої ізоляції від часу діяння напруги

В області малого часу, обчислюваного мікросекундами, пробій ізоляції має суто електричний характер, тобто не пов'язаний з хімічними, механічними та тепловими процесами, і залежність пробивної напруги від часу аналогічна вольт-секундним характеристикам газових проміжків (область А). При часі від 10 мкс до  $10^3 - 10^4$  мкс (область В) пробивна напруга залишається приблизно незмінною, тому що час розвитку суто електричного пробою значно менший, а механічні і хімічні процеси не встигають розвинути. В інтервалі часу від 0,01 с до 1 хв (область С) відбувається зниження електричної міцності,



особливо помітне при наявності рідких діелектриків, пов'язане, зокрема, з утворенням провідних місточків із домішків та іншими повільними процесами. При часі від 1 хв до декількох годин (область Д) пробій може бути обумовлений порушенням теплової стійкості ізоляції або процесами електричного старіння. При часі більше 10 годин (область Е) відбувається поступове, що триває іноді роками, зниження електричної міцності через старіння ізоляції завдяки зміні її властивостей під впливом зовнішніх електричних, теплових і механічних діянь.

Основний діелектрик зовнішньої ізоляції – атмосферне повітря, очевидно, не підлягає старінню, воно безперервно поновлюється природним способом, тому старіння зовнішньої ізоляції може спостерігатись тільки на тих ділянках, де розряд розвивається на поверхні твердих діелектриків.

У відповідності до наведеної залежності електричної міцності внутрішньої ізоляції від часу діяння напруги, а також з урахуванням можливих в умовах експлуатації електричних діянь для внутрішньої ізоляції розрізняють:

– короткочасну електричну міцність, яка, в свою чергу, підрозділяється на електричну міцність при грозових перенапругах (час діяння від одиниці до 1000 мкс) і електричну міцність при внутрішніх перенапругах (час діяння від одиниць мілісекунд до кількох секунд);

– тривалу електричну міцність, яка відповідає часу діяння від кількох годин до повного строку служби (25 – 30 років і більше).

Якщо ізоляція має достатній запас міцності по відношенню до короткочасних перенапруг, які виникають, то її строк служби визначається тривалою електричною міцністю. Іншими словами, тривала електрична міцність дорівнює робочій напрузі при часі діяння, що дорівнює строку служби ізоляції.

Оскільки фактичне значення електричної міцності внутрішньої ізоляції конкретного електричного апарату невідоме, а необхідно бути упевненим у тому, що його електрична міцність не нижче певної величини, ізоляція підлягає перевірці прикладанням випробувальних напруг, амплітуди яких установлюються стандартами.

Для випробування внутрішньої ізоляції використовуються стандартні повні та зрізані імпульси, еквівалентні грозовим перенапругам, і випробувальна напруга промислової частоти, яка імітує діяння внутрішніх перенапруг.

Випробувальні перенапруги характеризують лише короткочасну електричну міцність внутрішньої ізоляції. Тривала електрична міцність, яка визначається повільними процесами старіння, не може мати еквівалентну випробувальну напругу. Тому важливу роль в експлуатації високовольного обладнання з внутрішньою ізоляцією має систематичний контроль ізоляції. Іншими словами, придатність ізоляції до роботи протягом тривалого часу при діянні робочої напруги оцінюють за рядом непрямих показників. Серед них – опір ізоляції, кут діелектричних втрат, розподіл напруги, інтенсивність часткових розрядів, ємнісні характеристики ізоляції тощо.

#### **4.2. Система контролю внутрішньої ізоляції**

Надійність роботи електрообладнання і, отже, безперебійність постачання електроенергією споживачів багато в чому залежить від надійності ізоляції цього обладнання. Остання забезпечується комплексом різних заходів. При розробленні ізоляції аналізуються умови експлуатації та ймовірні зовнішні діяння, відбираються раціональні конструктивні рішення, нормуються режими роботи обладнання. При виготовленні використовуються високоякісні ізоляційні матеріали та досконалі технологічні процеси. Однак цих заходів недостатньо для забезпечення потрібної надійності, тому що при серійному виробництві і масовому застосуванні обладнання високої напруги завжди є деяка ймовірність появи в ізоляції дефектів через різного роду помилки в процесі виготовлення, транспортування, монтажу або під час експлуатації, а також внаслідок неврахованих зовнішніх діянь. Щоб знизити ймовірність аварійного пошкодження ізоляції, використовується система контролю внутрішньої ізоляції шляхом різних випробувань.

Ця система містить у собі такі етапи. Нова ізоляційна конструкція до передачі її у виробництво проходить державні, міжвідомчі випробовування, під час яких всебічно перевіряється її придатність до роботи в заданих умовах.

Готові ізоляційні конструкції, призначені для роботи в установках високої напруги, піддаються приймально-здавальним випробуванням на заводі-виготівнику, а потім на місці експлуатації після виконання монтажу. У процесі експлуатації стан ізоляції періодично контролюється при післяремонтних і профілактичних випробуваннях. Контроль ізоляції в експлуатації, який позначається часто терміном "профілактика ізоляції", служить для виявлення дефектів в ізоляційних конструкціях і наступної їх заміни чи відновлення на місці. При цих випробуваннях виявляється не тільки ізоляція з випадково виниклими дефектами, але також й ізоляція, що застаріла природним шляхом. Обсяг, методи і норми випробовувань установлюються відповідними стандартами, технологічними умовами і правилами технічної експлуатації електроустановок споживачів.

Метою профілактичних випробовувань ізоляції є своєчасне виявлення дефектів, що розвиваються, та недопущення пошкодження ізоляції в процесі експлуатації.

Ефективність випробовувань чи ймовірність правильного виявлення дефектної ізоляції при контролі не є 100%-ною. Вона залежить від методик випробовувань, характеристик використовуваної апаратури, значень вимірювальних параметрів, періодичності проведення випробовувань і т.д.

Застосовуються різні методи профілактичних випробовувань високовольтного обладнання, які містять у собі безпосередні вимірювання параметрів обладнання, випробовування його ізоляції та вимірювання певних характеристик, які дозволяють робити висновки про стан ізоляції, не руйнуючи її.

Безпосереднє вимірювання параметрів обладнання проводиться за допомогою розповсюджених вимірювальних методів, а зняття ізоляційних характеристик – за допомогою методів, специфічних для профілактичних випробовувань.

Через відсутність універсального методу, який дозволив би надійно оцінювати стан ізоляції високовольтного обладнання, доводиться користуватись у кожному випадку кількома методами. Комплекс цих методів вибирається різним для різних випадків. Так, контроль стану менш відповідального обладнання здійснюється за меншою кількістю контрольних параметрів, ніж для такого обладнання, як генератори, крупні трансформатори і т.п., випробовування яких супроводжується всебічним обстеженням.

Оцінення стану обладнання провадиться на підставі зіставлення всіх результатів випробовувань та аналізу поведінки об'єкта випробовувань в експлуатації.

Використовувані при всіх видах випробовувань методи можна класифікувати таким чином: руйнівні і неруйнівні. До перших належить випробовування підвищеною напругою, до других – усі інші методи, які проводяться без прикладання до ізоляції напруг, здатних спричинити пробій. Але з цієї ж причини всі неруйнівні випробовування є в деякій мірі непрямими.

Для виявлення дефектів, які виникають в ізоляції, розроблені і застосовуються такі методи неруйнівних випробовувань ізоляції:

- вимірювання опору ізоляції;
- вимірювання кута діелектричних втрат;
- вимірювання ємності;
- вимірювання розподілу напруги;
- вимірювання часткових розрядів в ізоляції;
- неелектричні методи контролю.

Перелічені методи контролю ізоляції по-різному виявляють неоднакові за характером дефекти. Останні звичайно умовно поділяють на дві групи: зосереджені і розподілені. До перших належать дефекти малих розмірів, наприклад проколи, тріщини, газові включення, а до других – дефекти, які охоплюють значні об'єми ізоляції, наприклад зволоження або забруднення. Зіставлення методів контролю ізоляції наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

## Зіставлення основних методів контролю ізоляції

Метод контролю	Дефекти, що виявляються	Дефекти, що не виявляються	Можливість помилкового вимірювання і тлумачення
Вимірювання	Загальне погіршення ізоляції в цілому	Місцеві дефекти одиничні, слабкі місця	Незначна
Вимірювання опору витоку	Наявність наскрізного провідного шляху витоку	Погіршення (старіння) ізоляції в цілому	Значна
Вимірювання ємності	Загальне зволоження ізоляції	Іонізаційне старіння, місцеві дефекти	Незначна
За розподілом напруги	Відсутність наскрізного провідного шляху витоку, частковий пробій	Іонізаційне старіння, загальне рівномірне зволоження	Невелика
За рівнем часткових розрядів	Іонізація в повітряній порожнині (одній або декількох), місцеві дефекти	Зволоження	Висока
Застосування підвищеної напруги	Одиничні слабкі місця	Місцеві або загальні, які не знизили пробивну напругу до рівня випробної	Незначна

**4.3. Випробовування ізоляції підвищеною напругою**

Випробовування підвищеною напругою провадиться для перевірки наявності необхідного запасу електричної міцності ізоляції. Основна ідея перевірки якості ізоляції підвищеною напругою дуже проста. До ізоляції прикладається випробна напруга, яка перевищує робочу. Якщо ізоляція нормальної якості,

вона витримує випробовування, якщо дефектна – пробивається. Загальний недолік таких випробовувань полягає в тому, що дефектна ізоляція необоротно руйнується.

Через те що зниження електричної міцності викликається, як правило, місцевими дефектами в ізоляції, випробовування підвищеною напругою є спосіб виявлення в ізоляції місцевих дефектів. Випробування підвищеною напругою гарантує також, що ізоляція обладнання має потрібний рівень міцності по відношенню до перенапруг, які виникають в експлуатації.

При профілактичних або післяремонтних випробуваннях перевіряється по суті здатність ізоляції пропрацювати без відмови до наступних, чергових випробувань. При цьому контроль ізоляції підвищеною напругою, як і інші методи, дає непряму оцінку не тільки короткочасної, а й тривалої електричної міцності ізоляції. Основне його завдання – перевірка відсутності грубих зосереджених дефектів.

Контроль ізоляції підвищеною напругою в умовах експлуатації проводиться для деяких видів обладнання (обертові машини, силові кабелі) з номінальною напругою не вище 35 кВ. Для обладнання більш високих класів напруги такий контроль утруднений, тому що джерела випробної напруги стають громіздкими і нетранспортабельними.

При профілактичних випробуваннях використовують як змінну, так і постійну випробну напругу. Остання має ряд переваг. По-перше, немає небезпеки появи потужних часткових розрядів, тому випробна напруга може бути збільшена для кращого виявлення дефектів. По-друге, під час випробувань можна вимірювати струм витоку і тим самим отримувати додаткову інформацію. По-третє, для випробувань постійною напругою можуть бути використані компактні випробні установки відносно невеликої потужності, розраховані лише на малі струми витоку. У випадку ж змінної напруги потрібна значна реактивна потужність через великі ємнісні струми, які протікають через випробовувану ізоляцію.

Недолік постійної випробної напруги полягає в тому, що вона розподіляється по товщині ізоляції згідно з питомими опорами, а не обернено пропорційно діелектричним проникностям ізоляційних матеріалів, як при робочій напрузі або

перенапругах. Тому відношення випробних напруженостей до робочих в окремих діелектриках виходять суттєво різними.

Ефективність контролю ізоляції підвищеною напругою при профілактичних випробуваннях залежить від величини випробувальної напруги.

Найбільш доцільне значення випробної напруги повинно вибиратись на підставі техніко-економічних розрахунків за умовою мінімуму сумарного збитку від помилково відбракованої нормальної ізоляції і від тих аварій, які може викликати не виявлена при випробуваннях дефектна ізоляція. При цьому слід враховувати, що якість ізоляції перевіряється ще й іншими методами, і, отже, деяка частина дефектної ізоляції може бути додатково виявлена іншими способами.

#### **4.4. Процеси, які використовують для неруйнівних методів контролю ізоляції**

Для контролю стану ізоляції застосовуються головним чином електричні методи неруйнівних випробувань, які базуються на двох основних явищах, що виникають в діелектриках під дією слабких електричних полів: електропровідності та електричній поляризації.

Електропровідність технічних діелектриків має, як правило, домішковий характер, тобто обумовлена рухом вільних іонів, що утворюються при дисоціації домішок, або рухом заряджених колоїдних частинок. Зі зростанням температури рухомість заряджених частинок зростає, тому збільшується й електропровідність.

Чим більше в ізоляції домішок, тим вище її електропровідність і тим нижче електрична міцність. Тому провідність або обернена їй величина – опір витoku ізоляції – можуть служити непрямыми показниками ступеню забрудненості і, отже, загального стану ізоляції.

При промисловій частоті з усіх видів поляризації найбільше виражені дипольна і міжшарова поляризації. Сутність дипольної поляризації полягає в орієнтації дипольних молекул у напрямі силових ліній електричного поля. У результаті на поверхні

діелектрика виникає надлишковий заряд, який підтягує на електроди заряд протилежного знаку. Зовнішньо ефект поляризації виявляється в тому, що після заряду ємності, яка визначається геометричними розмірами діелектрика, до електродів продовжує йти поляризаційний струм. Струм спадає за експоненціальним законом зі сталою часу  $T$  порядку мілісекунд.

Міжшарова поляризація обумовлена неоднорідністю структури ізоляції. Припустимо, що в основну речовину діелектрика вкраплені включення підвищеної провідності. Тоді струм зміщення в ізоляції протікає частково по провідностях включень (рис. 4.2). Тому при вмиканні діелектрика на постійну напругу в струмі виникає складова, обумовлена зарядом ємностей  $C$  через опір  $r$ . Зовнішньо цей процес протікає аналогічно дипольній поляризації – і в тому, і в іншому випадку поляризаційний струм змінюється приблизно за експоненціальним законом. Стала часу міжшарової поляризації лежить в широких границях – від мілісекунд до десятків секунд і більше.

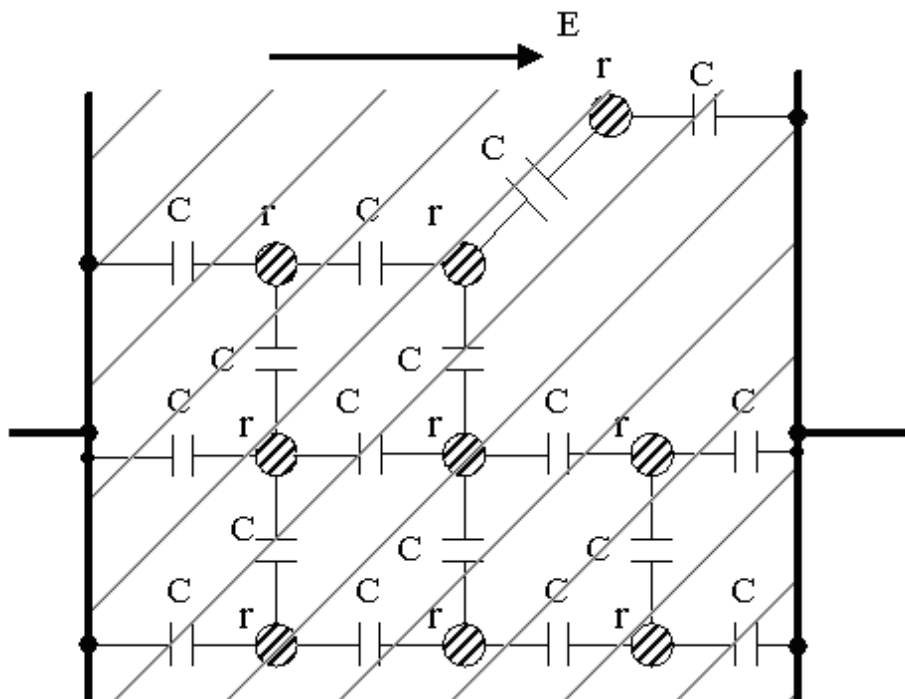


Рис. 4.2. Схема виникнення міжшарової поляризації



При розгляданні даного питання зручно види поляризації поділити не за фізичною ознакою, а за значенням сталої часу  $T$  – на швидку і повільну поляризацію. Швидка поляризація має  $T$  порядку мілісекунд, повільна – порядку секунд і більше.

Для обох видів поляризацій можна ввести схему заміщення ізоляції, показану на рис. 4.3. У цій схемі одна гілка складається з ємності  $C_\infty$ , друга гілка, яка містить ємність  $C = C_0 - C_\infty$  і опір  $r$ , відбиває поляризаційні процеси в ізоляції. (Зміст індексів  $0$  і  $\infty$  буде пояснено далі). Сумарна ємність схеми дорівнює  $C_\infty + (C_0 - C_\infty) = C_0$ . Ця ємність визначає повний заряд, який може накопичитись на електродах ізоляційної конструкції після завершення поляризаційних процесів. Крім цих гілок, у схему заміщення ввімкнено також опір ізоляції  $R$ , обумовлений наскрізними шляхами витoku при утворенні в ізоляції наскрізного містка з частинок підвищеної провідності.

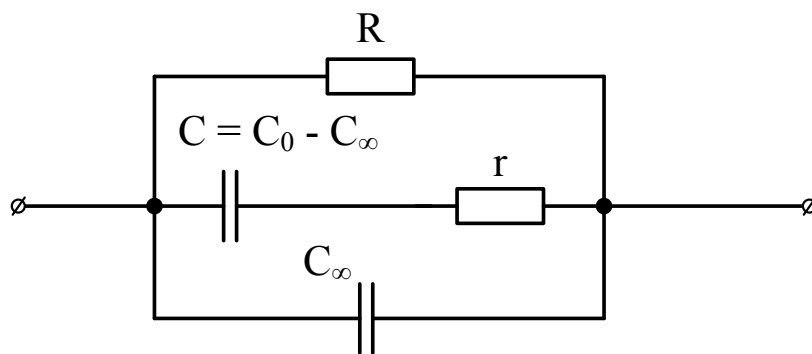


Рис. 4.3. Схема заміщення ізоляції

Якщо до схеми заміщення на рис. 4.3 прикласти поштовхом постійну напругу  $U$ , то струм в ізоляції буде мати такі складові, показані на рис. 4.4:

а) імпульс струму  $i_\infty$  заряду ємності  $C_\infty$ ;

б) поляризаційний (або абсорбційний) струм  $i_{abc} = \frac{U}{r} \cdot e^{-\frac{t}{T}}$  з постійною часу  $T$ ;

в) струм наскрізної провідності  $i_{np} = U/R$

На основі введеної схеми заміщення можна розглянути багато методів контролю ізоляції.

Поляризаційні явища пов'язані в основному із зволоженням ізоляції. Тому характеристики якості ізоляції, засновані на наведеній схемі заміщення, є переважно показниками зволоженості ізоляції.

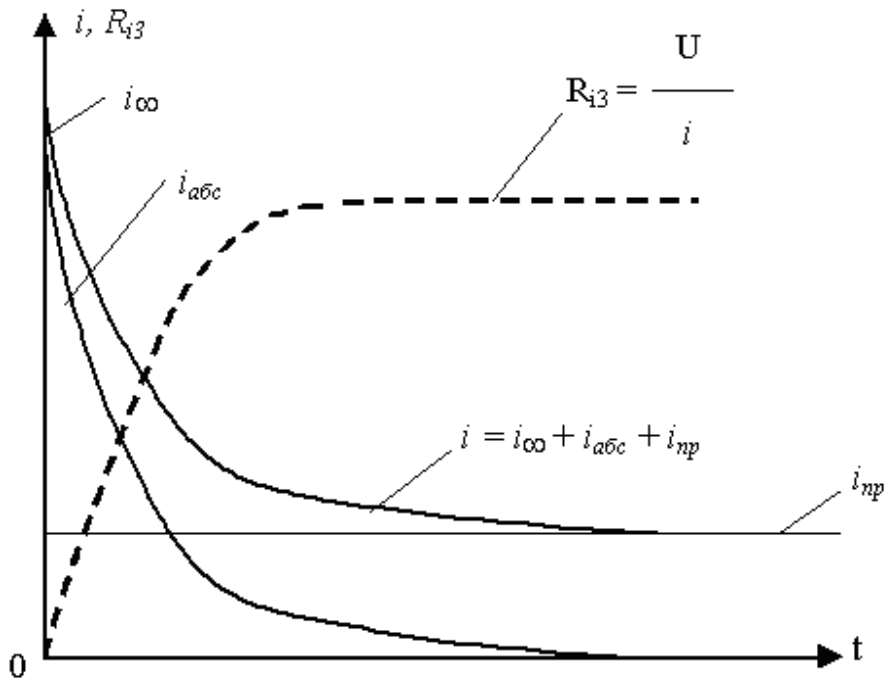


Рис. 4.4. Зміна в часі струму крізь ізоляцію та її опору при вмиканні на постійну напругу

#### 4.5. Контроль ізоляції за опором або струмом провідності

Найбільш поширеним методом профілактичних випробувань високовольтного обладнання є вимірювання опору ізоляції. Метод призначений для виявлення грубих дефектів, значного забруднення і зволоження ізоляції. Перевага методу полягає у великій чутливості до деяких місцевих дефектів і в простоті проведення вимірювань.

Цей метод застосовується ще й для контролю відсутності випадкового замикання випробуваного об'єкта на "землю", а також інших грубих дефектів, які можуть привести до

пошкодження об'єкта або випробної апаратури при випробуваннях іншими методами.

Вимірювання опору ізоляції застосовується при контролі стану всіх видів високовольтного обладнання.

При оціненні результатів вимірювань опору ізоляції доводиться рахуватись із залежністю цієї величини від геометричних розмірів випробовуваного об'єкта. З цієї причини опір ізоляції не завжди можна нормувати.

Вимірювання опору ізоляції звичайно здійснюється стрілковими приладами, і, отже, на показання приладів впливають тільки процеси повільної поляризації.

На рис. 4.4 пунктиром нанесено зміну в часі опору ізоляції, визначеного як  $R_{i3} = U/i$ . У відповідності до спаду струму  $i$  опір ізоляції  $R_{i3}$  зростає в часі. Для більшості ізоляційних конструкцій стала часу поляризації  $T$  менше 1хв. Це означає, що на момент  $T = 1$ хв після прикладення напруги  $U$  опір ізоляції  $R_{i3}$  досягає усталеного значення, що дорівнює, у відповідності до схеми на рис. 4.3, значенню  $R$ .

Величина  $R$  визначає, як вище було сказано, наявність скрізних провідних шляхів в ізоляції. Різке падіння  $R$  показує на розвиток дефекту в ізоляції, що зайшов уже далеко. Звичайно судження про ізоляцію складається на основі порівняння з результатами попередніх вимірювань або заводських даних.

Ізоляція може характеризуватись також поляризаційним спадом струму або зростанням опору ізоляції в часі. Це зростання виражається відношенням  $R_{t2}/R_{t1}$ , де  $R_{t2}$  і  $R_{t1}$  – опори ізоляції, виміряні при двох моментах часу  $t_2$  і  $t_1$  (звичайно  $t_2 = 60$ с і  $t_1 = 15$ с). Це відношення іноді називають коефіцієнтом абсорбції. Чим більше ізоляція містить побічних включень, зокрема чим більше зволожена ізоляція, тим менше коефіцієнт абсорбції.

Оцінення стану ізоляції за величиною коефіцієнта абсорбції провадиться при випробуванні об'єктів з великою ємністю (генераторів, електродвигунів, силових трансформаторів і т.п.).

Вимірювання опору ізоляції проводиться мегаомметрами, що складаються з малопотужного генератора постійного струму напругою 0,5 - 2,5 кВ (з ручним приводом) і стрілкового приладу.

#### 4.6. Контроль ізоляції за кутом діелектричних втрат

Протікання через діелектрик поляризаційних струмів веде до розігріву ізоляції. Пов'язані з цим втрати енергії називаються діелектричними. Діелектричні втрати при промисловій частоті виникають в основному за рахунок явищ швидкої поляризації.

При прикладенні до схеми заміщення ізоляції (рис. 4.3) змінної напруги усталений струм поляризації буде протікати по гілці  $rC$  і  $R$ . Сумарний активний струм, що протікає в схемі, дорівнює

$$I_a = U \cdot \left[ \frac{1}{R} + \omega \cdot C \frac{\omega T}{1 + (\omega T)^2} \right], \quad (4.1)$$

де  $T = rC$ ;

$\omega = 314$  (при  $f = 50$  Гц).

Сумарний ємнісний струм, що протікає в схемі, дорівнює

$$I_c = U \cdot \left[ \omega C_\infty + \omega \cdot C \frac{1}{1 + (\omega T)^2} \right]. \quad (4.2)$$

На рис. 4.5 побудована векторна діаграма струмів  $I_a$  і  $I_c$ . Відношення  $I_a/I_c = \operatorname{tg} \delta$  служить для характеристики діелектричних втрат в ізоляції, які дорівнюють

$$W = UI \cos \varphi \approx UI \operatorname{tg} \delta. \quad (4.3)$$

Оскільки кут  $\delta$  малий, то  $\operatorname{tg} \delta \approx \delta$  і тому часто кажуть про вимірювання не тангенса, а просто кута діелектричних втрат.

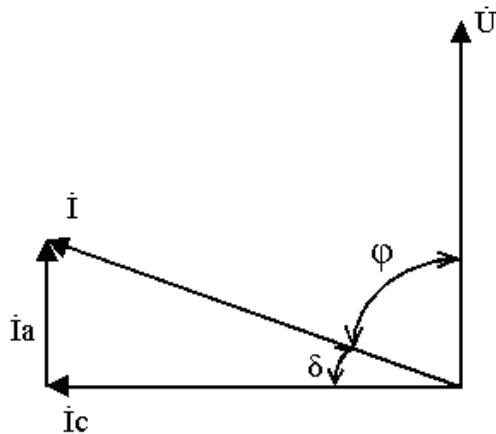


Рис. 4.5. Векторна діаграма напруги та струму в ізоляції, що знаходиться під напругою промислової частоти

Звичайно струм скрізної провідності  $U/R$  багато менше струму поляризації

$$U\omega C \frac{\omega T}{1 + (\omega T)^2}.$$

Отже, вимірюванням кута діелектричних втрат в основному контролюється гілка  $gC$  схеми заміщення ізоляції (рис. 4.3). Тому кут діелектричних втрат  $\epsilon$  в першу чергу показником наявності в ізоляції сторонніх включень, зокрема зволоження ізоляції.

Вважаючи  $R = \infty$ , знайдемо з (4.1) і (4.2)

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\left(\frac{C_0}{C_\infty} - 1\right)\omega T}{\frac{C_0}{C_\infty} + (\omega T)^2}. \quad (4.4)$$

З цього виразу видно, що  $\operatorname{tg}\delta$  не залежить від абсолютного значення ємності об'єкта, а тільки від відношення ємностей  $C_0/C_\infty$ . Тому  $\operatorname{tg}\delta$  служить універсальним показником якості ізоляції для об'єктів різної ємності, тобто габаритів.

Абсолютне значення  $\text{tg}\delta$  для об'єктів з невеликою ємністю (до 200 – 300пФ), наприклад для введів трансформаторів струму, може не тільки характеризувати загальний стан ізоляції, але також відзначати місцеві дефекти, які розвиваються. Граничні значення  $\text{tg}\delta$  для різного обладнання наведені в довідковій літературі. Для об'єктів з великою ємністю (наприклад, для крупних генераторів, електродвигунів, трансформаторів, кабелів і т.п.) значення  $\text{tg}\delta$  може вказувати на такі дефекти в ізоляції, як зволоження, загальне старіння, руйнування і т.п., але не може виявляти місцевих дефектів ізоляції, за виключенням зовсім розвинених.

З цієї причини для індикації гілки R (рис. 4.3), обумовленої скрізними містками підвищеної провідності, тобто виявлення місцевих дефектів, краще служить вимірювання опору ізоляції на постійному струмі.

Оскільки величини  $\text{tg}\delta$  зростають з підвищенням температури, то нормовані значення  $\text{tg}\delta$  відносять до певної температури, звичайно 20 °С.

Вимірювання  $\text{tg}\delta$  ізоляції здійснюється високовольтним мостом (Шеринга), в експлуатаційних умовах – малогабаритним мостом типу МД – 16.

## 4.7. Контроль ізоляції за ємнісними характеристиками

### 4.7.1. Метод "ємність – частота"

Ємність об'єкта при незмінній температурі і частоті є величина постійна. Тому стрибкоподібна зміна ємності свідчить про крупні дефекти в ізоляції – появу великих за об'ємом і добре провідних включень.

Для оцінення зволоженості ізоляції крупних об'єктів використовується залежність ємності від частоти. Ємність  $C_\omega$ , виміряна на частоті  $\omega$  для схеми на рис. 4.3, визначається співвідношенням

$$C_\omega = C_\infty + C \frac{1}{1 + (\omega T)^2}. \quad (4.5)$$

Залежність  $C_\omega = f(\omega)$  наведена на рис. 4.6. При  $\omega \rightarrow \infty$  ємність об'єкта мінімальна і дорівнює  $C_\infty$ . При нульовій частоті ємність об'єкта максимальна і дорівнює  $C_0$ .

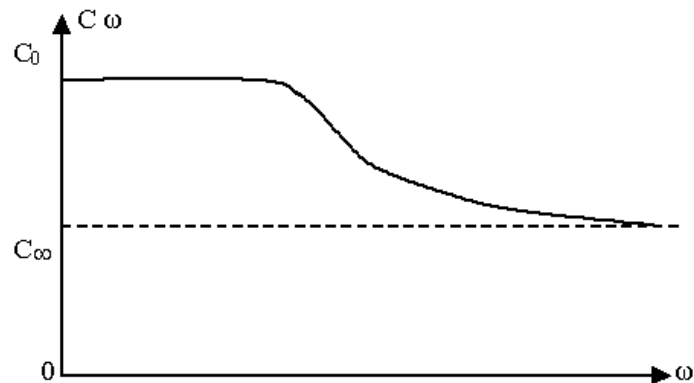


Рис. 4.6. Залежність ємності ізоляції від частоти прикладеної напруги

Чим більше ізоляція містить сторонніх включень, зокрема чим більше ізоляція зволожена, тим вище значення ємності  $C = C_0 - C_\infty$ . З іншого боку, сторонні включення практично не впливають на ємність  $C_\infty$ . Отже, вимірювання ємності об'єкта при двох частотах  $f_1$  і  $f_2$  дозволяють робити висновок про наявність в ізоляції сторонніх включень. Звичайно вимірювання ємності ведеться на частотах  $f_1 = 2$  Гц і  $f_2 = 50$  Гц. Показником якості ізоляції служить відношення  $C_2/C_{50}$ . Чим це відношення менше, тим ізоляція доброякісніша. Для сухої ізоляції відношення  $C_2/C_{50} = 1.2 \div 1.3$ . В міру зволоження відношення  $C_2/C_{50}$  зростає.

Для вимірювання відношення  $C_2/C_{50}$  використовується прилад, основним елементом якого є гальванометр, який вимірює струми розряду  $i_2, i_{50}$ , пропорційні відповідним ємностям об'єкта.

#### 4.7.2. Метод "ємність – час"

Сутність методу зводиться до визначення частини ємності, яка викликається повільними процесами міжшарової поляризації протягом заданого відрізка часу (приріст ємності  $\Delta C$ ), і окремо геометричної ємності об'єкта.

Більш детально це має такий вигляд. Вимірюються миттєві значення ємностей ізоляції через час  $\sim 1$  мс і час  $0,5 - 1$  с після прикладення зарядної напруги. У першому вимірюванні визначається геометрична ємність ізоляції  $C_\infty$ , у другому – ємність  $C_0$ .

Відношення

$$\frac{\Delta C}{C_\infty} = \frac{C_0 - C_\infty}{C_\infty}$$

служить характеристикою ізоляції.

Особливістю методу є більша, ніж в інших методах, чутливість до зволоження ізоляції. Це дозволяє контролювати процеси поверхневого зволоження. Вимірювання за цим методом проводяться лише в силових трансформаторах, не залитих маслом.

#### ***4.7.3. Метод "ємність – температура"***

Величина ємності сухої ізоляції змінюється з підвищенням температури мало, тоді як значне змінювання ємності завжди свідчить про зволоження ізоляції. Зростання ємності зволоженого діелектрика пояснюється додатковими поляризаційними процесами (іонна, структурна поляризація), які виявляються при змінюванні температури. Найзначніше збільшення ємності спостерігається при температурах  $60 - 80^\circ \text{C}$ , вимірювання проводять звичайно при температурах  $70$  і  $20^\circ$ .

Показником якості ізоляції служить відношення  $C_{70}/C_{20}$ . Для сухої ізоляції  $C_{70}/C_{20} \leq 1.2$ . У силових трансформаторів вимірювання за цим методом проводиться в тих випадках, коли з якихось причин трансформатор зазнає нагрівання (наприклад, при підсушенні).

Перевага цього методу полягає в тому, що властивості трансформаторного масла практично не чинять впливу на результати вимірювання.



Ємнісні методи контролю ізоляції дають задовільні результати в однорідній ізоляції (головним чином трансформаторах) і не завжди ефективні, хоч і застосовуються іноді як додаткові фактори оцінювання ізоляції неоднорідної, наприклад, ізоляції високовольтних електричних машин.

#### 4.8. Контроль ізоляції за розподілом напруги на елементах конструкції

В ізоляційних конструкціях, які складаються з ряду однотипних елементів, наприклад гірляндах ізоляторів, колонках опорних ізоляторів та ін., робоча напруга розподіляється по ємностям елементів конструкції, а також часткових ємностях відносно землі і струмовідних частин (рис. 4.7).

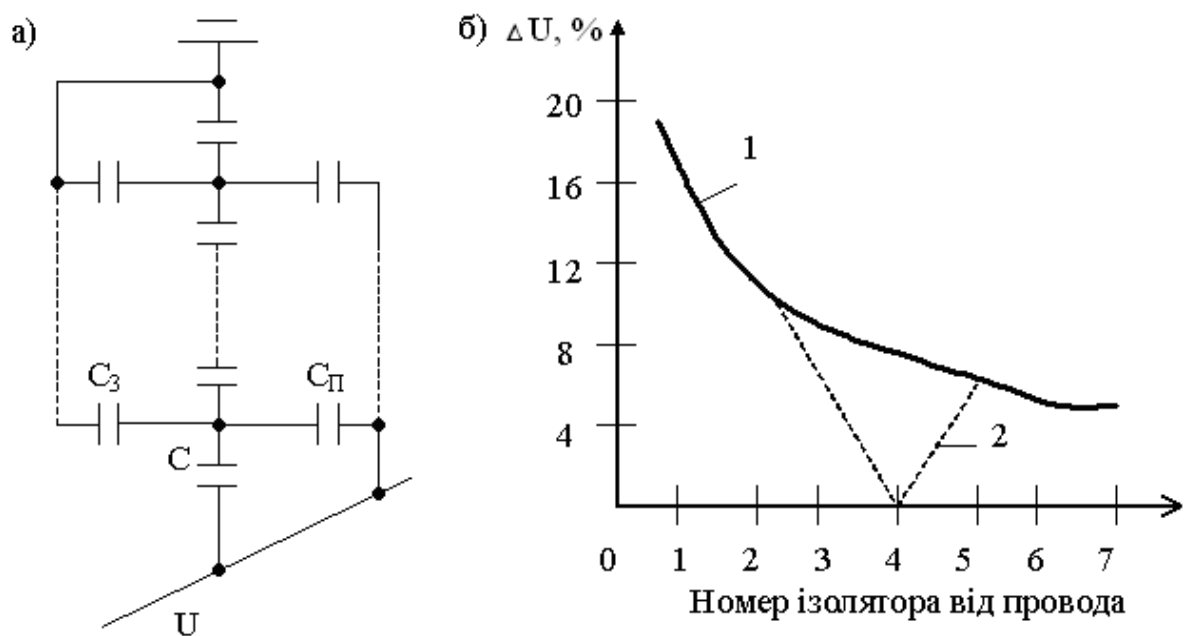


Рис. 4.7. Ємнісна схема заміщення гірлянди ізоляторів (а) і розподіл напруги по ізоляторах гірлянди (б):  
 1 – нормальний розподіл; 2 – пробитий четвертий ізолятор;  
 $C$  – власна ємність ізолятора;  $C_3$  – ємність ізолятора по відношенню до землі;  $C_{\Pi}$  – ємність ізолятора по відношенню до проводу

При різкому зниженні опору ізоляції окремих елементів розподіл напруги по всій конструкції спотворюється. Отже, вимірювання розподілу напруги по конструкції може бути використано для виявлення дефектних елементів. Для практичного застосування методу необхідно знати розподіл напруги по ізоляційній конструкції у робочому стані. Метод вимірювання розподілу напруги дозволяє провадити контроль за станом ізоляції під робочою напругою. Вимірювання здійснюється під робочою напругою за допомогою вимірювальної штанги. Вимірюється величина напруги на кожному елементі конструкції. Порівняння з розподілом напруги в нормальному стані вказує на дефектні елементи конструкції.

#### 4.9. Виявлення іонізаційних процесів в ізоляції

Розвиток в ізоляції іонізаційних процесів приводить до додаткового розсіювання енергії, пов'язаної з нейтралізацією зарядів на ємності газових включень. З цієї причини розвиток іонізаційних процесів повинен підвищувати  $\text{tg}\delta$  ізоляції. Іонізаційні процеси в ізоляції можуть бути виявлені шляхом зняття залежності  $\text{tg}\delta$  від напруги, прикладеної до ізоляції. Така залежність отримала назву кривої іонізації (рис. 4.8).

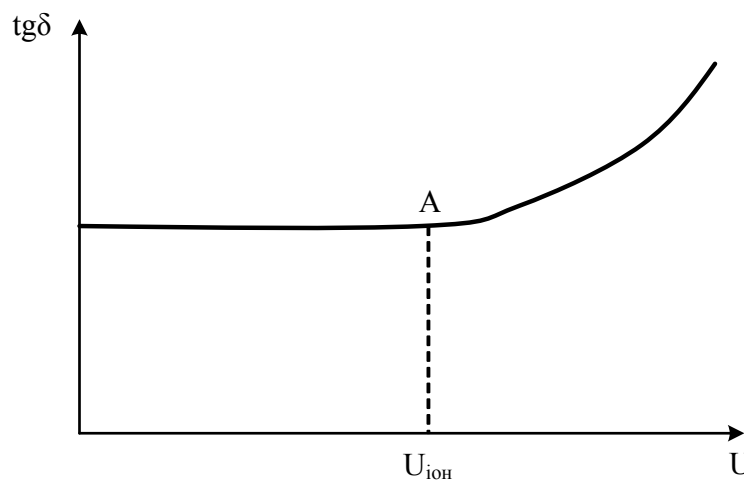


Рис. 4.8. Залежність  $\text{tg}\delta$  ізоляції від прикладеної напруги (крива іонізації)

В інтервалі  $U < U_{\text{іон}} \text{tg}\delta$  залишається практично незмінним. У точці А, що називається точкою іонізації, спостерігається злам кривої, і в подальшому  $\text{tg}\delta$  різко зростає із зростанням напруги. Очевидно, що при нарузі  $U_{\text{іон}}$  в ізоляції починають інтенсивно розвиватись іонізаційні процеси.

Інший метод виявлення іонізаційних процесів заснований на безпосередньому вимірюванні часткових розрядів у газових включеннях.

Часткові розряди виникають при розшаруванні ізоляції, утворенні газових включень, тріщин і при значній зміні розподілу напруги по ізоляції. Від інтенсивності часткових розрядів залежить швидкість руйнування ізоляції. Тому характеристики часткових розрядів вимірюються.

Існують методи, засновані на реєстрації акустичних, світлових і електромагнітних явищ, що викликаються частковими розрядами. Найчастіше для цієї мети використовуються електричні методи (електричні схеми).

Наприклад, в основу методу високочастотної дефектоскопії покладено виявлення імпульсу напруги або струму перехідного процесу в колі та електромагнітного поля струму часткового розряду. Однією з основних переваг методу є можливість контролю стану ізоляції під робочою напругою. Метод може бути використаний для контролю стану ізоляції генераторів, трансформаторів при випробуванні їх підвищеною напругою і під робочою напругою в лабораторіях високої напруги.

Часткові розряди створюють в рідкому середовищі звукові та ультразвукові коливання. Зараз розробляються методи виявлення часткових розрядів у маслонаповненій апаратурі на основі звукової дефектоскопії. Існують також методи контролю на основі просвічування ізоляції рентгенівськими променями. Зазначені методи належать до неелектричних методів контролю ізоляції і в цьому посібнику не розглядаються.

#### 4.10. Хроматографічний аналіз газів у трансформаторному маслі

До неелектричних методів контролю відносять: хроматографічний аналіз газів у трансформаторному маслі, ультразвукові методи контролю, радіохвильові методи, тепловізійний метод, рентгенографічний метод і т. ін.

Найбільшого поширення в останній час набув хроматографічний аналіз розчинених в маслі газів. Ідея методу основана на тому, що пошкодження в трансформаторі супроводжується виділенням різних газів, які відсутні в маслі при нормальній роботі. Ці гази першопочатково розчинюються в маслі і в газове реле практично не попадають. Виділивши ці гази з масла і зробивши їх аналіз, можна виявити пошкодження ізоляції трансформатора на різній стадії їх виникнення.

Відбір масла проводиться так, щоб виключити його контакт з навколишнім повітряним середовищем для запобігання втратам розчинених в маслі газів. Масло заключають в замкнений об'єм і газ над поверхнею масла аналізують на хроматографі. Оцінення стану маслонаповненого обладнання здійснюється на підставі таких критеріїв:

- критерій граничних концентрацій (водень, метан, етилен, етан, ацетилен, окис та двоокис вуглецю і ін. гази); розкладання масла приводить до підвищення концентрації різних газів, часткові розряди приводять до появи водню і т.д.;
- критерій швидкості зростання концентрації газів – при щомісячному контролі;
- критерій відношень концентрацій газів – співвідношення концентрацій дозволяє виявити перегрів та навіть температуру перегріву;
- критерій рівноваги – порівняння результатів аналізу масла з газового реле та із проби.

Хроматографічний аналіз газів проводиться на комп'ютерних комплексах, що дозволяє автоматизувати аналіз критеріїв та розпізнати дефекти, що з'являються в обладнанні, до відмови цього обладнання.

## Контрольні питання

1. Дайте визначення внутрішньої ізоляції.
2. Назвіть особливості внутрішньої ізоляції.
3. Охарактеризуйте механізм пробою рідких діелектриків.
4. Дайте характеристику пробою твердих діелектриків.
5. Визначте термін «тепловий пробій».
6. Як відбувається пробій в маслобар'єрній і паперово-масляній ізоляції?
7. Що означає термін «старіння» ізоляції?
8. Сформулюйте мету профілактичних випробувань ізоляції.
9. Назвіть методи неруйнівних випробувань ізоляції.
10. Яким чином відбувається контроль ізоляції при випробуванні її підвищеною напругою?
11. Нарисуйте і прокоментуйте схему заміщення ізоляції.
12. Як проводиться оцінювання результатів вимірювань опору ізоляції?
13. Визначте поняття «коефіцієнт абсорбції».
14. Для виявлення яких дефектів призначений метод контролю ізоляції за опором?
15. Якими приладами здійснюється вимірювання опору ізоляції?
16. Яка методика вимірювання опору ізоляції?
17. До яких наслідків призводить «зволоження ізоляції»?
18. Які властивості ізоляції характеризує кут діелектричних втрат?
19. Як проводять контроль ізоляції виміром кута діелектричних втрат?
20. Перелічіть ємнісні методи контролю ізоляції і дайте характеристику будь-якому з них.
21. Яким чином проводиться контроль ізоляції вимірюванням її ємності?
22. В чому причина нерівномірного розподілу напруги по гірлянді ізоляторів?
23. Навіщо і яким чином контролюють часткові розряди в ізоляції?
24. На якому принципі засновано хроматографічний аналіз розчинених в маслі газів?
25. За якими критеріями здійснюється оцінювання маслорозповненого обладнання за хроматографічним методом?

## Розділ 5

### ВИМІРЮВАННЯ ПРИ ВИСОКИХ НАПРУГАХ І ВИПРОБУВАЛЬНІ УСТАНОВКИ

#### 5.1. Вимірювання при високих напругах

Такі вимірювання проводять при випробуванні високовольної апаратури на підприємствах і в лабораторіях, дослідженні атмосферних і внутрішніх перенапруг, проведенні науково-дослідних робіт і т. ін.

Найчастіше доводиться вимірювати напруги, струми та потужності – змінні, постійні та імпульсні. Трудність вимірювань при високій нарузі обумовлена:

а) впливом сильного електричного поля, що створюється об'єктом, який досліджується, на вимірювальний прилад;

б) великими електричними напруженостями на елементах вимірювального приладу і появою корони, що спотворює показання приладу;

в) дуже малими струмами в котушках вимірювальних приладів, внутрішнє споживання енергії яких не повинно бути велике, і незначними динамічними зусиллями між котушками, котрі мають до того ж великі проміжки;

г) вимогами надійної ізоляції вимірювального приладу від землі;

д) вимогами зручного відліку та безпечної роботи з приладом.

Вимірювання при високій нарузі можуть бути основані за принципом використання механічної взаємодії між зарядженими електродами, пробою проміжку між електродами, іонізації в газі або твердому тілі.

До приладів, що вимірюють високі напруги, струми, потужності, ставлять низку вимог: безпосередній відлік, рівномірність шкали, найменша похибка, найменша схильність до впливу сторонніх електричних і магнітних полів, а також атмосферних умов.

**Вимірювання високих напруг.** Прилади, призначені для цієї мети, діляться на дві великі групи: ті, що вимірюють діюче значення, і ті, що вимірюють амплітудне значення. До першої групи належать електростатичні вольтметри різної конструкції, до другої – кульові розрядники, схеми з конденсаторами, з випрямлячами і т. ін.

### **5.1.1. Електростатичні вольтметри**

**Вимірювання абсолютним електростатичним вольтметром.** Прилад цього типу (рис. 5.1) вперше був розроблений в 1916 р. академіком А.А. Чернишевим. Вимірювана змінна напруга  $U$  підводиться до нерухомого диску 1. Заземлене коромисло 4 металічно зв'язане з рухомим диском 2. Між обома дисками з'являється однорідне поле і виникає сила електростатичної взаємодії

$$F_{\text{ел}} = \frac{d}{dx} \cdot \frac{CU^2}{2} = \frac{d}{dx} k \frac{\epsilon S_0}{2x} U^2 = -k \frac{\epsilon S_0 U^2}{2x^2}, \quad (5.1)$$

де  $k$  - коефіцієнт, що залежить від вибору одиниць;  
 $\epsilon$  - діелектрична проникність середовища між дисками;  
 $x$  - відстань між дисками;  
 $S_0$  - площа диска 2.

Момент цієї сили  $F_{\text{ел}} l_2$  зрівноважують моментом сили електромагнітної взаємодії  $F_{\text{ем}} = \alpha I^2$  між рухомою 5 і нерухомою 6 котушками, через котрі тече один і той же струм  $I$ . В цьому випадку

$$F_{\text{ем}} l_2 = \alpha I^2 l_1 = k \epsilon \cdot S_0 U^2 \frac{l_2}{2x^2}, \quad (5.2)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт, який враховує конструкцію котушок і їх взаємоположення.

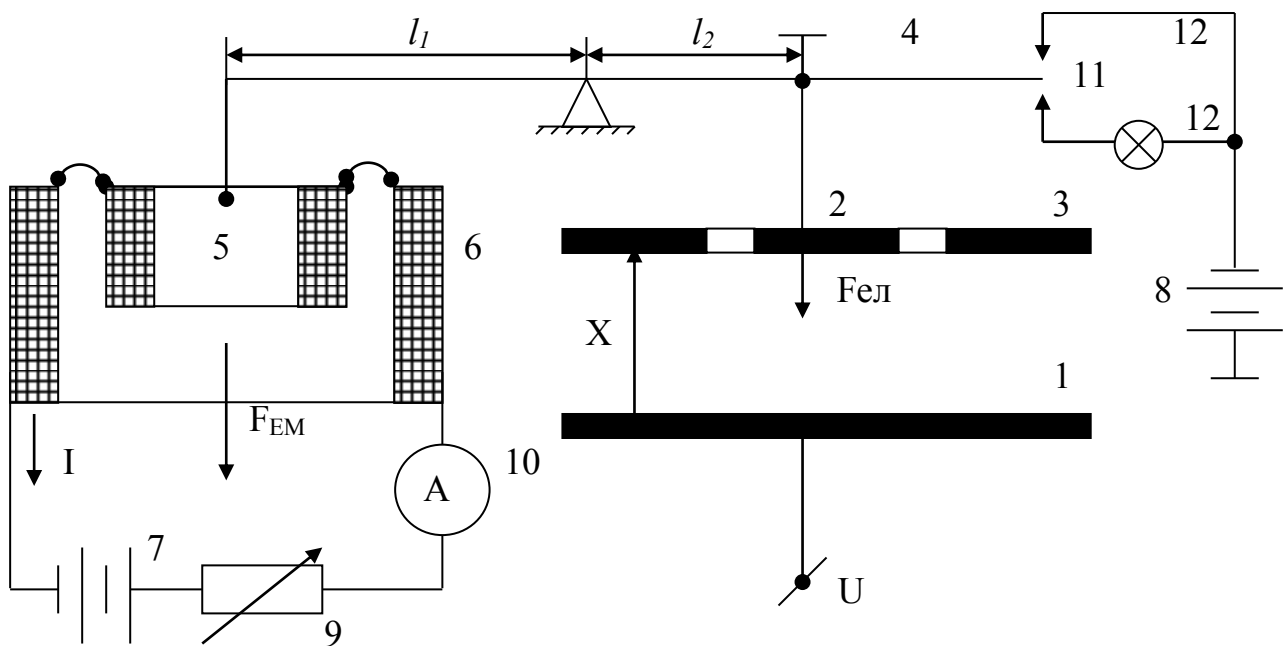


Рис. 5.1. Схема абсолютного электростатического вольтметра:

- 1 – нерухомий диск; 2 – рухомий диск; 3 – охоронне кільце;
- 4 – коромисло; 5 і 6 – рухома і нерухома котушки;
- 7 і 8 – акумуляторні батареї; 9 – опір, що регулюється;
- 10 – амперметр; 11 – упори; 12 – сигнальні лампи

Змінюючи опір 9, добиваються незмінного положення рухомого диска (це визначається за відсутністю світіння ламп 12, коли вільний кінець коромисла знаходиться у нейтральному положенні між близько розташованими контактними упорами 11).

Отже,

$$U = Ix \sqrt{\frac{2a \cdot l_1}{k\varepsilon \cdot S_0 l_2}} = k_0 I. \quad (5.3)$$

Таким чином, вимірюване діюче значення напруги пропорційне струму  $I$ . Сталі величини під знаком радикалу можуть бути обчислені та знайдений коефіцієнт пропорційності  $k_0$ . Тому вольтметри цього типу називаються абсолютними. За допомогою них може бути проведено градуювання інших електростатичних вольтметрів. Принципово можлива заміна



котушок чашкою з еталонними гирями. Для розширення границь вимірювання диски або вольтметр цілком розмішують у посудині з газом з підвищеним тиском або з маслом. Пробій проміжку між дисками при перевищенні границь вимірювальної напруги не виводить прилад із ладу, оскільки електрична міцність проміжку відновлюється.

### Вимірювання кульовим електростатичним вольтметром.

В конструкції цього вольтметра (рис. 5.2) відстань  $S$  між двома кульовими електродами 1 і 2 не залишається незмінною. Зміщення верхньої кулі під дією напруги  $U$  призводить до розтягування пружини 3 і повороту дзеркала за допомогою нитки 4, що зв'язує це дзеркало 6 з рухомою кулею. Як і у попередньому випадку, сила взаємодії між кулями визначається як похідна від енергії  $\frac{CU^2}{2}$  за координатою  $S$ , де  $C$  – ємність системи.

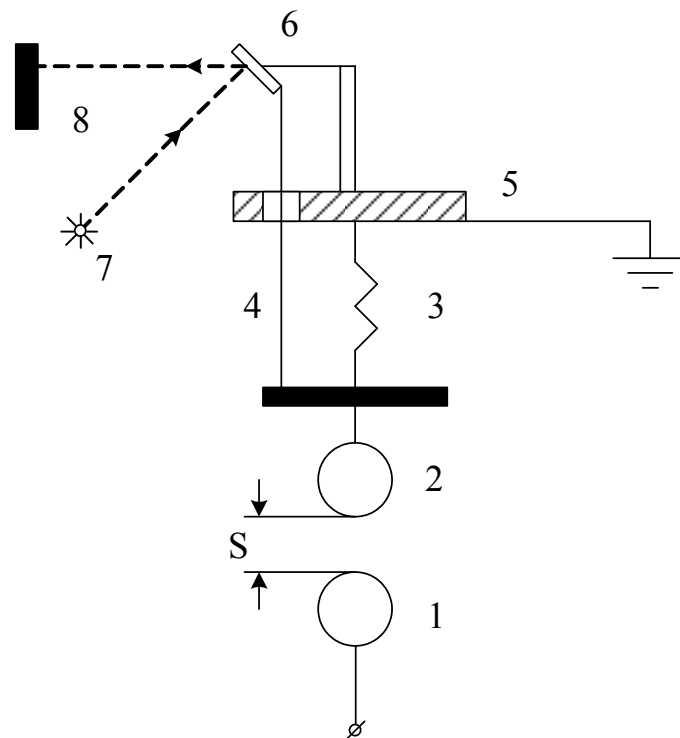


Рис. 5.2. Схема кульового електростатичного вольтметра:

- 1 – нерухома куля, 2 – рухома куля; 3 – пружина;
- 4 – ізоляційна нитка; 5 – опорна плита; 6 – дзеркало;
- 7 – лампа; 8 – шкала

**Вимірювання технічним електростатичним кіловольтметром.** Як вольтметр з безпосереднім відліком вимірювальної напруги використовується кіловольтметр типу С100, загальний вигляд якого наведений на рис. 5.3. Прилад являє собою тригранний (25-50-75кВ) лабораторний прилад електростатичної системи із світловим відліком. Один з електродів закріплений на опорному ізоляторі і є нерухомим. Другий електрод виконаний як екран з отвором, усередині якого розташований рухомий електрод, закріплений розтяжками. Для одержання достатньо рівномірної шкали вибрана спеціальна форма як отвору в екрані, так і самого рухомого електрода. Під дією електричного поля між електродами рухомий електрод повертається; при цьому розтяжки закручуються і утворюють момент протидії. Заспокоєння руху рухомої частини здійснюється за допомогою повітряного заспокоювача. Для збільшення чутливості прилад обладнаний світловим відліком.

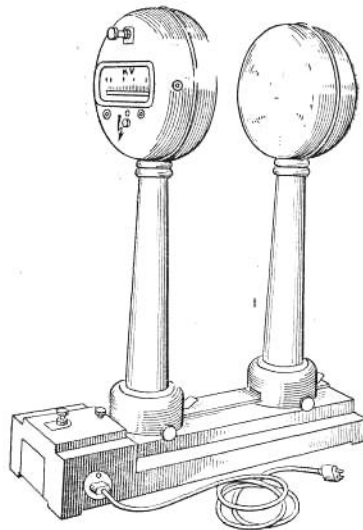


Рис. 5.3. Технічний електростатичний кіловольтметр типу С100

Перехід з однієї границі вимірювань на іншу здійснюється шляхом переміщення нерухомого електрода разом з опорним ізолятором вздовж основи приладу, внаслідок цього змінюється відстань між електродами.

Кіловольтметр дозволяє вимірювати постійну й змінну напругу з частотою від 45 Гц до 0,5 МГц в колах з одним заземленим полюсом. Основна похибка в робочій частині шкали не перевищує  $\pm 1,5\%$ .

### ***5.1.2. Вимірювання кульовими розрядниками***

Кульові розрядники призначені для вимірювання амплітудних значень змінної напруги будь-якої частоти, а також постійної та імпульсної напруг. Їх принцип дії базується на тому, що амплітуда пробивної напруги  $U_{\max}$  залежить від довжини проміжку  $S$ , діаметра куль  $D$ , відносної густини повітря  $\delta$ , тобто  $U_{\max} = \varphi(S, D, \delta)$ .

Визначення  $U_{\max}$  можна проводити аналітично і за таблицями. Ці таблиці є результатом ретельної обробки експериментальних досліджень розрядних напруг кульових розрядників у лабораторіях світу. Розрядна напруга в газах залежить від тиску, температури і вологості, тому стандартні таблиці відповідають нормальному тиску повітря 760 мм рт.ст. і температурі  $20^{\circ}\text{C}$ .

Під час випробувань ізоляційних конструкцій застосовується несиметричне вмикання, коли одна з куль заземлена (рис. 5.4). Ефект полярності при імпульсних напругах виникає внаслідок неоднаковості електричних полів біля поверхні куль при такому вмиканні, оскільки напруженість поля на поверхні верхньої кулі вище напруженості на поверхні нижньої кулі. Ця різниця зростає із збільшенням відстані між кулями.

Під час вимірювання напруги необхідно: стежити за чистотою поверхні куль; прибирати від них сторонні предмети на відстані від  $14D$  для куль діаметром в декілька сантиметрів і до  $(6-7)D$  для куль діаметром в 100-200 см; вмикати послідовно захисний опір  $R_3$ , оскільки без нього пробій проміжку викликав би коротке замикання у вимірюваній установці. Цей опір також знижує перенапругу і попереджує появу коливального процесу. Звичайно, величина  $R_3$  вибирається для постійної і змінної напруг з рахунку 1 Ом на 1 В.

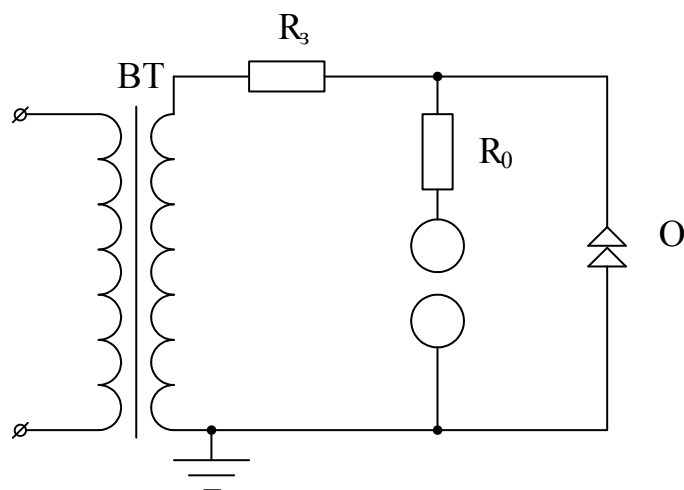


Рис. 5.4. Схема вмикання кульового розрядника:  
 ВТ – випробувальний трансформатор;  $R_3$  – захисний опір трансформатора;  $R_0$  – захисний опір розрядника;  
 О – об’єкт випробування

Для відстаней між кулями до  $0,5D$  таблиці дають значення розрядних напруг з похибкою, що не перевищує 13%.

Перевагами кульового розрядника як вимірювача напруги вважаються: великий діапазон вимірюваних напруг; придатність для вимірювання всіх видів напруг; мала інерційність і низький коефіцієнт імпульсу при довгих імпульсах; мала похибка; дуже слабка залежність від вологості повітря (не більше 1 %) внаслідок порівняно високої однорідності поля між кулями; простота конструкції та методики вимірювання.

До недоліків відносяться: вплив стану поверхні на розрядну напругу; потреба в декількох розрядах для виключення випадкових величин і отримання середнього значення (перші виміри звичайно до уваги не беруться); необхідність дотримання деякого інтервалу для деіонізації проміжку після пробою; залежність точності вимірювання від відношення  $S/D$ ; різкий спад напруги на об’єкті під час розряду; деяка залежність точності вимірювання від частоти; трудність спостереження за підйомом напруги.

### 5.1.3. Вимірювання амплітуд напруг за допомогою конденсаторів і випрямлячів

**Вимірювання за величиною випрямленого струму.** Сутність цього методу полягає у вимірюванні струму через конденсатор відомої ємності  $C_1$  і випрямляч  $B_2$  (рис. 5.5) протягом одного півперіоду. В другий півперіод струм конденсатора тече крізь випрямляч  $B_1$ .

При ідеальних випрямлячах з нульовими внутрішніми опорами кількість електрики, що протікає через мікроамперметр за півперіод зростання від  $-U_{\max}$  до  $+U_{\max}$  (або зменшення) змінної напруги, що має один максимум за півперіод, дорівнює  $2C_1U_{\max}$ . Показання мікроамперметра пропорційні середньому значенню струму за період, тобто

$$I_{\text{ср}} = \frac{q}{T} = 2f \cdot C_1 \cdot U_{\max}, \quad (5.4)$$

де  $f$  - частота вимірюваної напруги;

$U_{\max}$  - амплітудне значення вимірюваної напруги, що визначається з цього співвідношення.

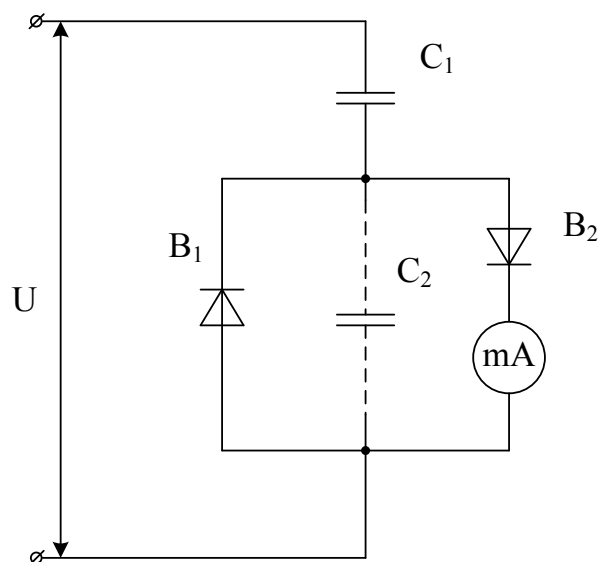


Рис. 5.5. Схема для визначення амплітуди високої напруги шляхом виміру випрямленого струму

Таким чином, показання мікроамперметра в колі випрямляча В<sub>2</sub> будуть пропорційні амплітудним значенням вимірюваної напруги. Похибка вимірювання цього методу визначається, головним чином, похибкою вимірювання ємності С<sub>1</sub>.

**Вимірювання за величиною випрямленої напруги.**  
Електрична схема вимірюваної установки наведена на рис. 5.6.

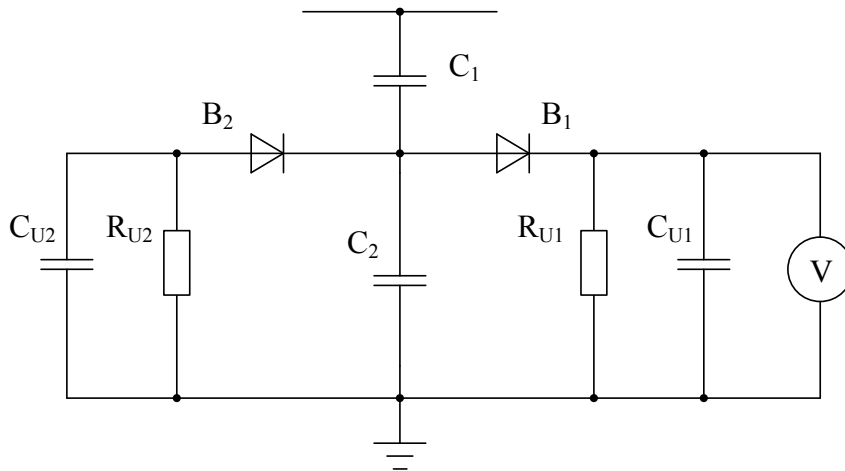


Рис. 5.6. Схема для визначення амплітуди високої напруги шляхом виміру випрямленої напруги

Конденсатори С<sub>1</sub> і С<sub>2</sub> являють собою ємнісний подільник напруги. Застосування двох випрямлячів В<sub>1</sub> і В<sub>2</sub> виключає накопичення заряду на конденсаторі С<sub>2</sub> в стаціонарному режимі. В той же час конденсатори С<sub>U1</sub> і С<sub>U2</sub> заряджаються до найбільшої напруги

$$U_{U \max} = U_{\max} \left( \frac{C_1}{C_1 + C_2} \right), \quad (5.5)$$

але з різними полярностями.

Опори R<sub>U1</sub> і R<sub>U2</sub> призначені для розряду вимірювальних конденсаторів С<sub>U1</sub> і С<sub>U2</sub> при повторних вимірюваннях. Щоб електростатичний вольтметр точніше відображував стрибки і зниження вимірюваної напруги, треба зменшити величину

опору  $R_U$ ; однак при цьому виникає "розрядна похибка" внаслідок зниження напруги на конденсаторах  $C_U$  за час відсутності струму через випрямляч на протязі кожного періоду. На конденсаторах  $C_U$  утворюється пульсуюча напруга, до того ж глибина пульсації тим більша, чим менше сталі часу  $T_U = R_U C_U$ .

У випадку синусоїдної напруги з частотою 50 Гц при сталій часу  $T_U = 0,87$  с різниця між найбільшим і найменшим значеннями напруги на вимірювальному конденсаторі  $C_U$  становить 2.2%. Середнє значення напруги в цьому випадку становить  $0.98U_{Umax}$ , де  $U_{Umax}$  – амплітудне значення напруги на вимірювальному конденсаторі. Це середнє значення дорівнює діючому значенню напруги, що показує електростатичний вольтметр. Цей метод забезпечує похибку вимірювання амплітуд синусоїдної напруги не більше 1%.

#### **5.1.4. Подільники напруги**

Подільники напруги являють собою пристрої, що дозволяють вимірювати деяку цілком визначену частину загальної вимірювальної напруги  $i$ , завдяки цьому використовувати для вимірювань простіші прилади і схеми, ніж це вимагається для безпосереднього вимірювання дуже високих напруг.

Подільники напруги складаються із послідовно з'єднаних активних опорів або ємностей, або комбінацій цих елементів і вмикаються між електродом, що знаходиться під високою напругою і землею.

Відношення високої напруги  $U_1$ , що подається на подільник, до напруги  $U_2$ , що вимірюється приладом, називається коефіцієнтом ділення подільника

$$k = \frac{U_1}{U_2}. \quad (5.6)$$

Знаючи коефіцієнт ділення, можна обчислити повну вимірювальну напругу за формулою

$$U_1 = kU_2. \quad (5.7)$$

В першому наближенні, без урахування нерівномірності розподілу напруги вздовж подільника і різних спотворюючих факторів, коефіцієнт ділення може бути виражений через параметри подільника:

для активного подільника

$$k = \frac{R_1 + R_2}{R_2}; \quad (5.8)$$

для ємнісного подільника

$$k = \frac{C_1 + C_2}{C_1}, \quad (5.9)$$

де  $R_1$  і  $C_1$ ,  $R_2$  і  $C_2$  - активні опори і ємності високовольтних і низьковольтних плечей активного і ємнісного подільників.

До подільників напруги ставляться такі основні вимоги:

1) підмикання подільника не повинно впливати на амплітуду і форму вимірюваної напруги;

2) коефіцієнт ділення не повинен залежати від частоти і амплітуди вимірюваної напруги в робочому інтервалі вимірювання цих величин;

3) в подільнику мають бути відсутні корона і витік по ізоляції;

4) енергія, що розсіюється в подільнику, не повинна викликати помітної зміни його коефіцієнта ділення.

Під час вимірювання високих постійних напруг застосовують активні подільники з дроту високого опору або з недротових опорів. Повний опір подільника має бути таким, щоб струм, що тече через подільник, знаходився в межах від десятків до 1-2 мА.

Для збільшення теплоємності подільника і підсилення його ізоляції опори подільника можуть бути занурені в масло. Активні подільники постійної напруги виготовляються для вимірювань напруг до 2000 кВ.



При вимірюванні високих напруг промислової частоти застосування активних подільників пов'язано з низкою труднощів: потрібні громіздкі і коштовні опори на високі напруги; через вплив ємнісних струмів, що протікають крізь паразитні ємності елементів подільника відносно землі, виникають похибки вимірювань. У зв'язку з цим звичайно для вимірювань високих напруг промислової частоти застосовують ємнісні подільники, які у порівнянні з активними мають менші розміри і вартість їх нижче.

В ємнісних подільниках паразитні ємності елементів на землю не мають суттєвого значення, оскільки їх додання до власної ємності елементів не змінює залежності коефіцієнта ділення подільника від частоти. Крім того, ємнісні подільники не споживають активної енергії.

Як ємності подільника використовуються конденсатори з керамічним діелектриком, а також паперово-масляні конденсатори.

Для вимірювання імпульсних напруг застосовуються як активні, так і ємнісні подільники.

Вимірювання імпульсної напруги із застосуванням подільників напруги здійснюється за допомогою катодного осцилографа, що дозволяє фіксувати величину і форму вимірюваної напруги. Найбільш часто при осцилографуванні високих імпульсних напруг використовують ємнісні подільники. Для послаблення спотворень використовуються різні спеціальні схеми ємнісних подільників, наприклад схема М.Ф. Пашина.

## **5.2. Випробувальні установки високої напруги**

### ***5.2.1. Випробувальні трансформатори***

Випробувальні трансформатори застосовуються для отримання високої напруги промислової частоти. Для випробувальної напруги 500-750 кВ застосовують одиничні трансформатори. Більш високі напруги отримують, з'єднуючі такі трансформатори за каскадною схемою. Випробувальні трансформатори виконуються однофазними на невеликі потужності, оскільки під час випробувань ізоляції

електрообладнання у вторинній обмотці з'являється ємнісний струм, А,

$$I_c = U_{\text{випр}} \omega C \cdot 10^{-3}, \quad (5.10)$$

де  $U_{\text{випр}}$  - напруга, кВ;  
 $C$  - ємність об'єкту, мкФ;  
 $\omega$  - кутова частота.

Потрібна потужність випробувального трансформатора, кВА, визначається з виразу

$$S = U_{\text{випр}}^2 \omega C \cdot 10^{-3}. \quad (5.11)$$

Особливостями випробувальних трансформаторів є короткочасність роботи, відсутність дії атмосферних перенапруг, а також можливість стрибків струму і різких спадів напруги на виводах під час пробою ізоляції випробуваних об'єктів.

Ці особливості знаходять відображення в конструкції випробувальних трансформаторів: в них простіше вирішуються питання охолодження, значно нижчі, ніж у силових трансформаторах, запаси електричної міцності ізоляції. Завдяки цьому розміри випробувальних трансформаторів у багато разів менше силових. Захист трансформаторів від перенапруг, що виникають при різких спадах напруги, здійснюється за допомогою ємнісних кілець, екранів і шляхом підсилення ізоляції перших витків обмоток. Для обмеження стрибків струму в колі високого боку вмикається захисний опір з розрахунку 0,5-1 Ом на 1 В номінальної напруги трансформатора.

Випробувальні трансформатори виконуються звичайно однофазними, оскільки електрообладнання випробується пофазно. Обмотка високої напруги (ВН) найчастіше має один вивід, а другий кінець обмотки з'єднаний з корпусом і осердям. Така схема обмотки ВН відповідає умовам випробувань електрообладнання і дозволяє випробувати ізоляцію по відношенню до заземленого корпусу. Ізоляція обмотки ВН трансформатора може бути виконана ступінчастою, із

зменшенням її в напрямі від лінійного кінця обмотки до її заземленого кінця. Заземлення корпусу трансформатора полегшує умови експлуатації відносно техніки безпеки.

Недоліки таких трансформаторів: наявність складного виводу, що збільшує їх розміри, неможливість відбирати напругу від проміжних точок обмотки високої напруги.

Випробувальні трансформатори можуть виконуватися з масляною і повітряною ізоляцією. Перші володіють герметичністю, надійною ізоляцією окремих елементів і меншим розсіянням магнітного потоку через менші відстані між цими елементами. Масло виконує в основному функцію ізолюючого середовища.

Однофазні масляні трансформатори випускаються на напругу від 100 до 500 кВ.

Сухі трансформатори не потребують спеціальних виводів, мають меншу висоту, простіші у виготовленні, забезпечують доступ до багатьох елементів обмоток і відбір напруги від проміжних точок, менше пожежонебезпечні. Однак вони мають більшу індуктивність розсіяння, гіршу криву вихідної напруги і потребують встановлення в сухих приміщеннях, які вентилуються. Тому вони менш поширені.

Для одержання випробних напруг промислової частоти більше 500 кВ використовуються каскадні установки, що складаються звичайно з двох-трьох трансформаторів (рис. 5.7). Вторинні обмотки трансформаторів з'єднані послідовно, що дозволяє отримати на виході випробувальної установки напругу, рівну сумі напруг одиничних трансформаторів

$$U_{\text{вих}} = n \cdot U_{\text{ном}}, \quad (5.12)$$

де  $n$  - кількість трансформаторів;

$U_{\text{ном}}$  - номінальна (випробна) напруга трансформатора.

Каскад отримує живлення від генератора або підстанції через обмотку низької напруги 1 першого трансформатора. Корпус його заземлений і має нульовий потенціал. Вивід обмотки високої напруги 2 цього трансформатора з'єднується із

заземленим кінцем обмотки високої напруги другого трансформатора. Оскільки другий бак виявився під потенціалом  $U_{\text{НОМ}}$ , то він ізолюється від землі на цю напругу за допомогою ізолюючих опор 6. Відстань між баками має бути такою, щоб не було розряду між ними при  $U_{\text{НОМ}}$ . Живлення другого трансформатора здійснюється за допомогою збуджуючої обмотки 3. Кожна з них ізолюється від корпусу на напругу декілька більшу  $U_{\text{НОМ}}$  і має ту ж кількість витків, що й обмотка 1. Останній трансформатор у каскаді може не мати обмотки збудження.

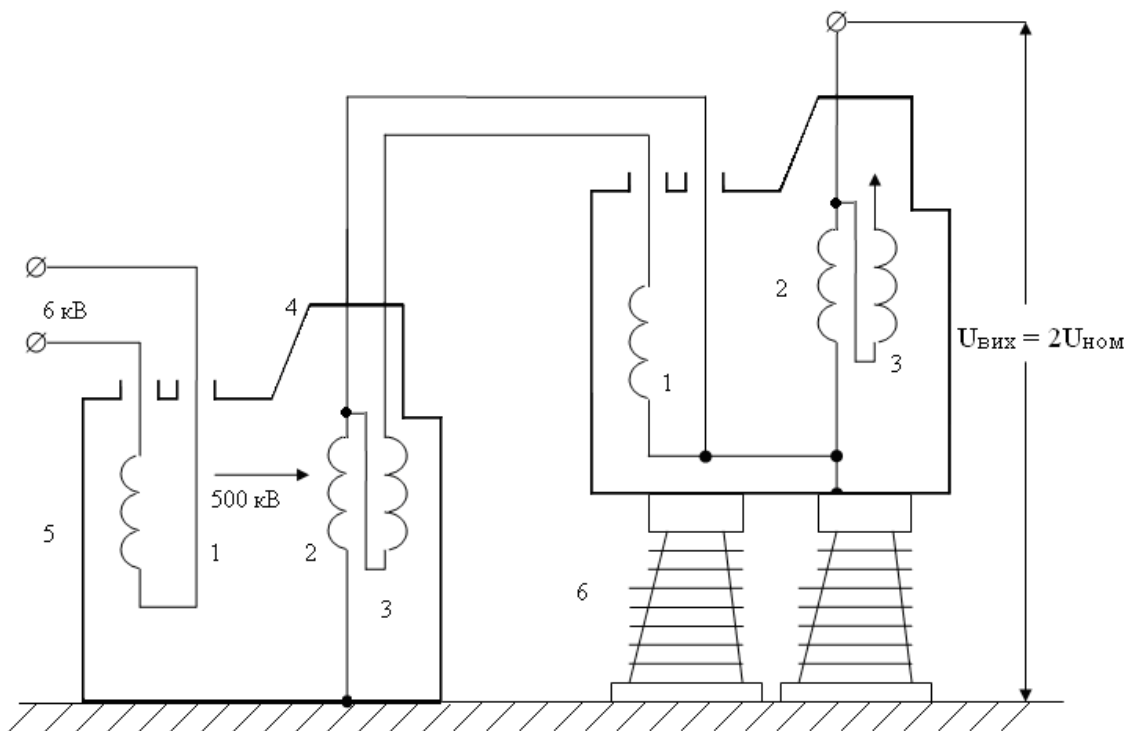


Рис. 5.7. Каскадне з'єднання двох випробних трансформаторів:  
1 – обмотка низької напруги; 2 – обмотка високої напруги;  
3 – збуджуюча обмотка; 4 – вивід високої напруги;  
5 – бак; 6 – ізолюючі опори

Особливість каскадного з'єднання полягає в тому, що вся потужність каскаду міститься у першому трансформаторі. У випадку трьох трансформаторів потужність другого повинна складати  $2/3$  потужності каскаду, потужність останнього  $1/3$ . Отже, сумарна потужність всіх трьох елементів у цьому випадку вдвічі більша потужності на вході. Це недолік, як і наявність

збуджуючих обмоток. До позитивних властивостей каскадного з'єднання належать: застосування трансформаторів з меншою ізоляцією обмоток відносно землі; можливість отримання зниженої напруги від проміжних елементів; менші вага та об'єм всієї установки; полегшення монтажу та ремонту; можливість роботи частини каскаду при виході з ладу одного трансформатора.

### **5.2.2. Установки випрямленої напруги**

Для отримання випрямленої напруги застосовуються різні схеми, котрі можна поділити на зарядні установки і каскадні генератори.

Зарядні схеми виконуються на порівняно невеликі напруги - до 400 кВ і служать в основному для зарядження конденсаторів генераторів імпульсних напруг і струмів і для випробування невеликих об'єктів. На рис. 5.8 наведені найбільш поширені зарядні схеми.

Наведена на рис. 5.8, б схема подвоєння напруги набула найбільшого поширення, оскільки при її застосуванні потрібний трансформатор на напругу, вдвічі меншу, ніж вихідна. Крім того, в цій схемі зворотна напруга, прикладена до вентилів В у непровідний півперіод, не перевищує напругу на навантажувальній ємності незалежно від величини активного навантаження. Захисні опори, що вмикаються в зарядних схемах, призначені для обмеження струму короткого замикання, захисту обмотки трансформатора від перенапруг і обмеження імпульсних струмів крізь вентиля під час зрізу внаслідок розряду навантажувальної ємності.

Для отримання високих постійних напруг застосовуються каскадні генератори. Одна з схем каскадних генераторів наведена на рис. 5.9. З рисунка видно, що каскадний генератор складається з низки схем рис. 5.8, в і, отже, напруга холостого ходу на виході такого генератора дорівнює добутку амплітуди напруги трансформатора на кількість вентиляльних груп. Основним недоліком такої схеми є велика чутливість до опору навантаження, яка викликає помітні пульсації напруги. Для зменшення пульсацій застосовуються подвоєні каскадні схеми з паралельним живленням.

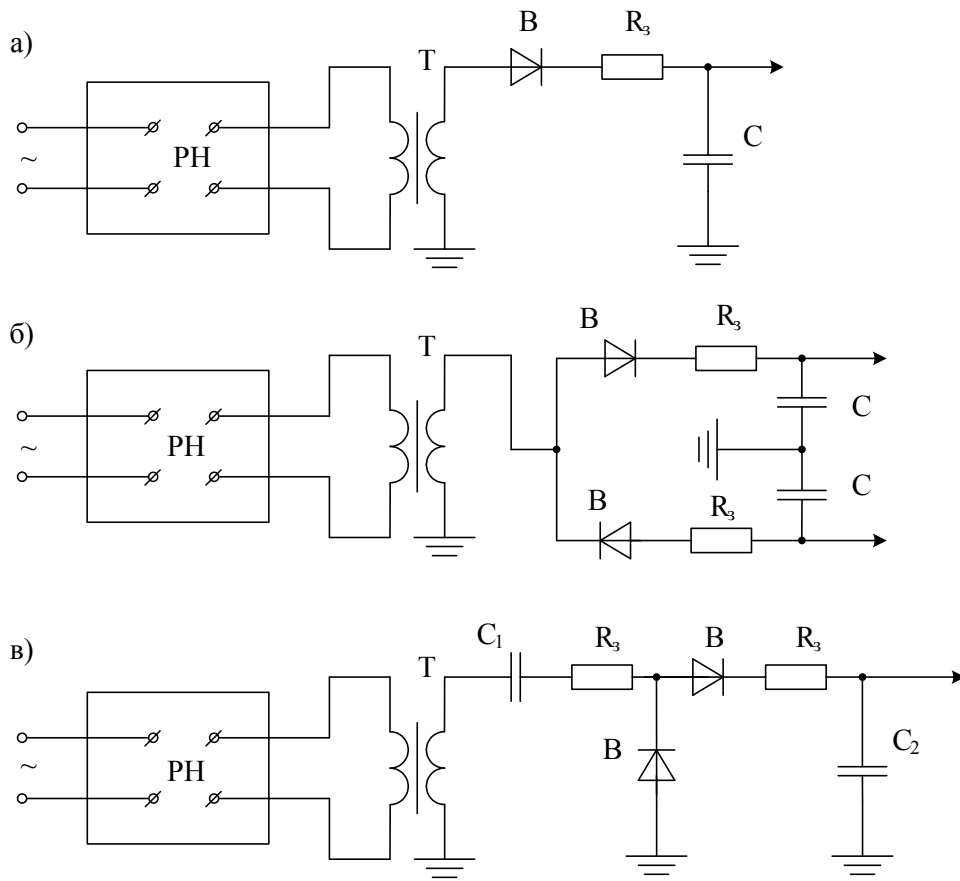


Рис. 5.8. Зарядні схеми:

а) однопівперіодна; б) подвоєння напруги; в) перший ступінь схеми множення напруги; РН – регулятор напруги; Т – підвищувальний трансформатор; В – вентиль;  $R_3$  – захисний опір;  $C_2$  – навантажувальний конденсатор

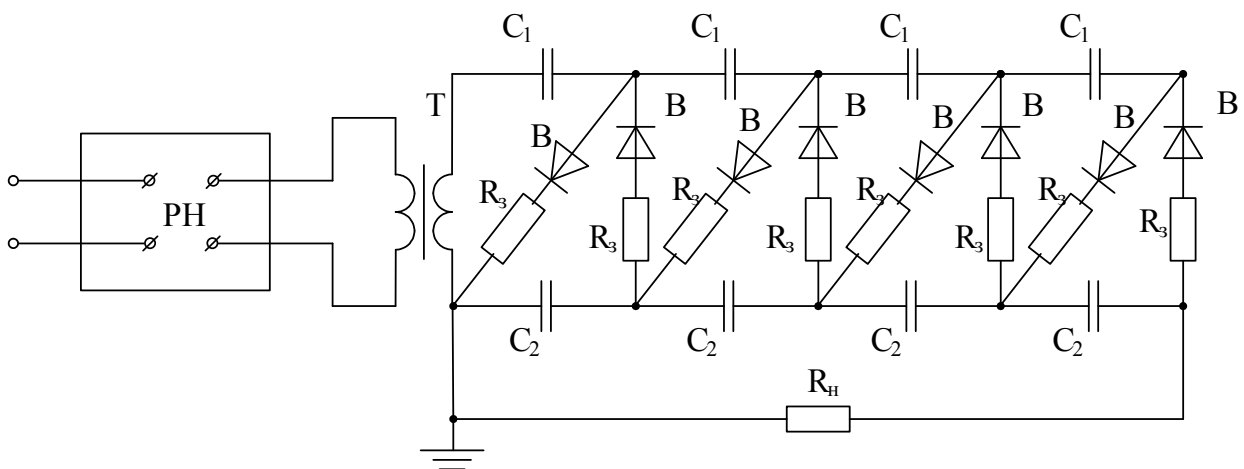


Рис. 5.9. Принципова схема каскадного генератора:  $R_н$  – опір навантаження (решта позначень та сама, що і на рис. 5.8)

У теперішній час в наведених схемах поширені вентиля, виконані на напівпровідникових елементах, котрі шунтуються ємностями для рівномірного розподілу напруги.

### 5.2.3. Генератори імпульсних напруг

Високі імпульсні напруги, потрібні для імпульсних випробувань ізоляційних конструкцій, можуть бути отримані шляхом використання декількох конденсаторів, які заряджаються від випрямної установки до однієї напруги, а потім з'єднуються послідовно, так що їх напруги складаються. Автоматичне і практичне миттєве перемикавання з паралельного на послідовне з'єднання здійснюється іскровими проміжками.

Одна з схем такого генератора імпульсних напруг (ГІН) наведена на рис. 5.10.

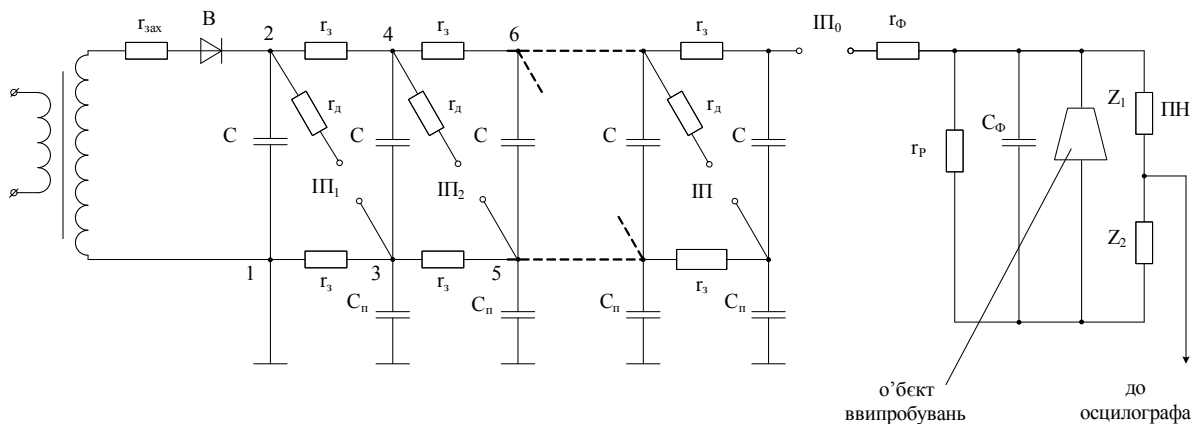


Рис. 5.10. Схема генератора імпульсних напруг

Конденсатори  $C$  заряджаються через великі опори  $r_{\text{зах}}$  і  $r_3$ , причому  $r_{\text{зах}} \gg r_3$ , чим забезпечується одночасне зарядження конденсаторів до однакової напруги. На момент закінчення процесу зарядження потенціали точок 1,3,5 і т.д. дорівнюють нулю, а потенціали точок 2,4,6 – амплітудному значенню напруги  $U_0$  трансформатора, що живить. Відстань між електродами іскрових проміжків  $\Pi$  встановлюється таким чином, щоб напруга  $U_0$  була достатня для пробою тільки першого проміжку  $\Pi_1$ . Після пробою  $\Pi_1$  точка 3 набуває потенціалу  $U_0$  (з'єднуючись через іскровий

проміжок і невеликий опір  $r_d$  з точкою 2). Точка 4 практично миттєво набуває потенціалу  $2U_0$  (потенціал точки 3, доданий до напруги  $U_0$ , до якої заряджено конденсатор  $C$ , ввімкнений між точками 3 і 4). Потенціал точки 5 залишається практично рівним нулю, оскільки паразитна ємність  $C_n$  точки 5 заряджається через великий опір  $r_3$  відносно повільно. Таким чином, напруга на іскровому проміжку П2 миттєво зростає з  $U_0$  до  $2U_0$  і цей проміжок пробивається слідом за проміжком П1. Після цього точка 5 отримує потенціал  $2U_0$ , а точка 6 – потенціал  $3U_0$ , пробивається наступний іскровий проміжок і т.д.

В результаті послідовного пробою проміжків усі конденсатори виявляються з'єднаними послідовно, їх напруги складаються. Сумарна напруга, прикладена до проміжку П0, викликає його пробій, після чого починається процес розряду ємностей  $C$  на формуючу схему  $R_f-R_p-C_f$ . Невеликі опори  $r_d$ , ввімкнені послідовно в коло розряду, призначені для демпфування коливань, котрі можуть виникнути при розряді в контурі з ємностей ГН і паразитних індуктивностей схеми.

Таким чином, напруга на виході ГН буде приблизно дорівнювати  $nU_1$ , де  $n$  - кількість конденсаторів ГН;  $U_1$  – зарядна напруга одного ступеня.

Для отримання потрібної форми імпульсу на виході ГН вмикаються фронтовий опір  $R_f$ , ємність  $C_f$  і розрядний опір  $R_p$ , через який розряджається ємність ГН  $C = C/n$ .

#### ***5.2.4. Генератори внутрішніх перенапруг***

Призначення такого генератора – випробування апаратури за умовами, аналогічними тим, котрі виникають при внутрішніх перенапругах. Ці перенапруги мають в більшості випадків коливальний характер і великий діапазон частот (від 50 Гц до 10 кГц). В генераторі (рис. 5.11) спочатку конденсатори  $C_1$  і  $C_2$  коливальних контурів заряджають від трансформатора  $T_2$ . Якщо після цього замкнути рубильник  $P$ , то конденсатори почнуть розряджатися через індуктивності  $L_1$  і  $L_2$  відповідно.



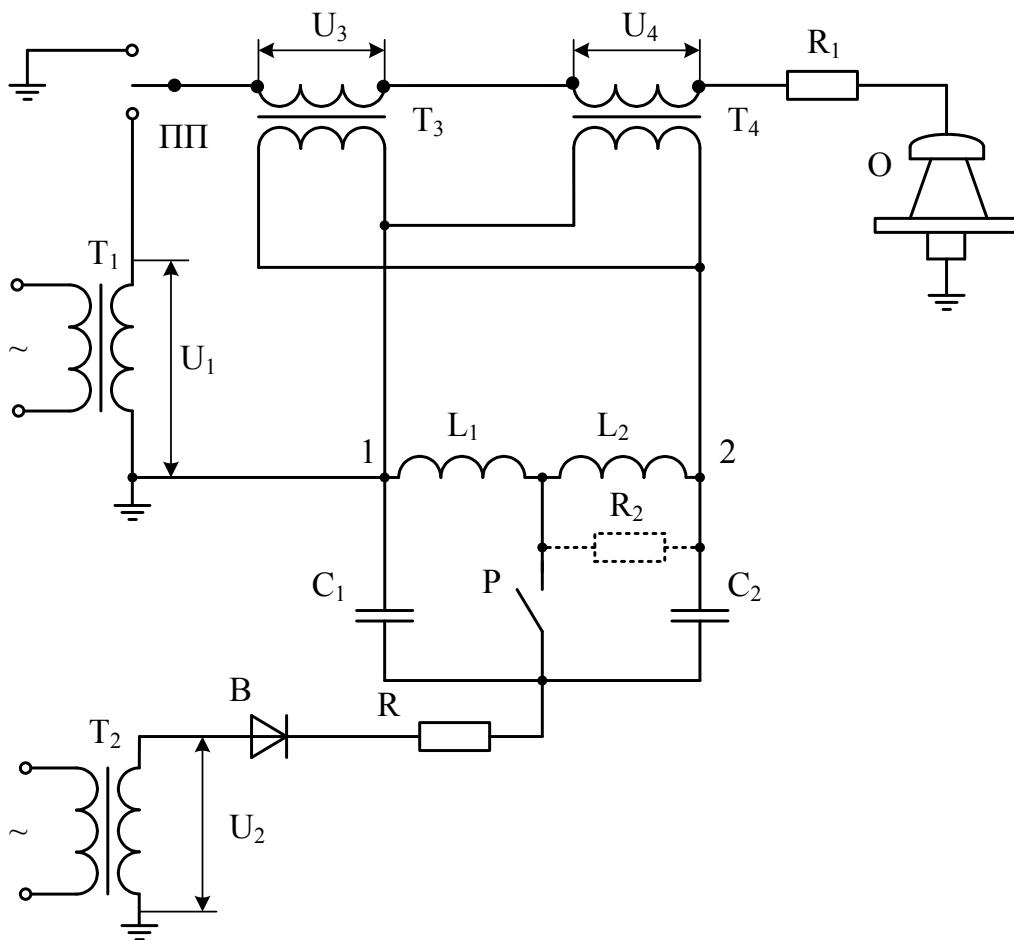


Рис. 5.11. Схема генератора внутрішніх перенапруг з трансформаторами:  $T_1$ - $T_4$  – однофазні підвищувальні трансформатори;  $V$  – випрямляч;  $L_1$ ,  $L_2$  – котушки індуктивності;  $C_1$ ,  $C_2$  – конденсатори;  $R$ ,  $R_1$  – захисні опори;  $R_2$  – активний опір для аперіодичного розряду;  $P$  – рубильник; ПП – перемикач;  $O$  – об'єкт

Оскільки контури ввімкнені зустрічно, то в початковий момент напруга між точками 1 і 2 (а отже, і на затискачах первинних обмоток трансформаторів  $T_3$  і  $T_4$ ) буде дорівнювати нулю. Далі вона буде підвищуватися, оскільки  $C_1 \neq C_2$  і  $L_1 \neq L_2$ . Швидкість підвищення напруги і частота на затискачах 1 і 2 буде залежати від власних частот контурів. Якщо перемикач ПП поставити в верхнє положення, то об'єкт отримує напругу, що дорівнює сумі вторинних напруг  $U_3$  і  $U_4$ . Якщо ж перемикач встановити в нижнє положення і тим самим ввімкнути

додатковий трансформатор  $T_1$ , тоді вказана вище сума вихідних напруг трансформаторів  $T_3$  і  $T_4$  накладається на синусоїдну напругу з частотою мережі. Можна синхронізувати ПП так, щоб це накладання відбулося при заданому миттєвому значенні вихідної напруги  $U_1$ .

Якщо замість індуктивності  $L_2$  ввімкнути активний опір  $R_2$ , то тоді другий контур дає аперіодичний розряд і між точками 1 і 2 виходить сума коливальної і аперіодичної напруги.

Такі пристрої дозволяють отримати частоту випробної напруги в декілька сотень герц.

### Контрольні питання

1. На які групи поділяються прилади для вимірювання високих напруг? Які прилади належать до цих груп?
2. Для чого призначений світловий відлік у електростатичному кіловольтметрі?
3. Назвіть принцип вимірювання напруги за допомогою подільників напруги.
4. На чому засновано принцип дії кульового розрядника?
5. Які засоби використовують для вимірювання високих змінних напруг?
6. Які засоби використовують для вимірювання високих постійних напруг?
7. Які засоби використовують для вимірювання високих імпульсних напруг?
8. Назвіть особливості випробувальних трансформаторів.
9. Що розуміють під каскадним з'єднанням двох випробувальних трансформаторів?
10. Наведіть спрощену зарядну схему для отримання випрямленої напруги.
11. Наведіть спрощену схему генератора імпульсних напруг.
12. Наведіть спрощену схему генератора внутрішніх перенапруг.

## Розділ 6

# ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПЕРЕНАПРУГ В ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ. ВНУТРІШНІ ПЕРЕНАПРУГИ

### 6.1. Класифікація перенапруг

Під перенапругою розуміють будь-яку напругу, що перевищує амплітуду найбільшої робочої напруги ( $U_{н.р.}$ ) на ізоляції елементів електрообладнання. Для номінальних напруг 3-220 кВ розрахунок  $U_{н.р.}$  проводиться за формулою  $U_{н.р.}=1,15U_{ном.}$

Основними характеристиками перенапруг є:

- максимальне значення  $U_{max}$  або кратність  $K=U_{max}/U_{н.р.}$  по відношенню до амплітуди відповідної найбільшої робочої напруги. Іноді кратність визначають по відношенню до фазної напруги;
- тривалість дії;
- форма кривої тощо.

Усі перелічені характеристики перенапруг мають значний статистичний розкид, тому що вони залежать від ряду факторів, у тому числі і випадкових.

Усі перенапруги (рис. 6.1) за природою появи поділяють на:

- внутрішні;
- зовнішні, або атмосферні.

Внутрішні перенапруги породжуються коливаннями електромагнітної енергії, що знаходиться всередині електричної системи. Розрізняють два класи внутрішніх перенапруг:

- комутаційні, які виникають при вмиканнях і вимиканнях елементів системи у нормальних та аварійних режимах;
- резонансні, обумовлені наявністю в енергосистемах індуктивностей та ємностей.

Амплітуда внутрішніх перенапруг, як правило, не перевищує  $(3,0-3,5)U_{ф.}$

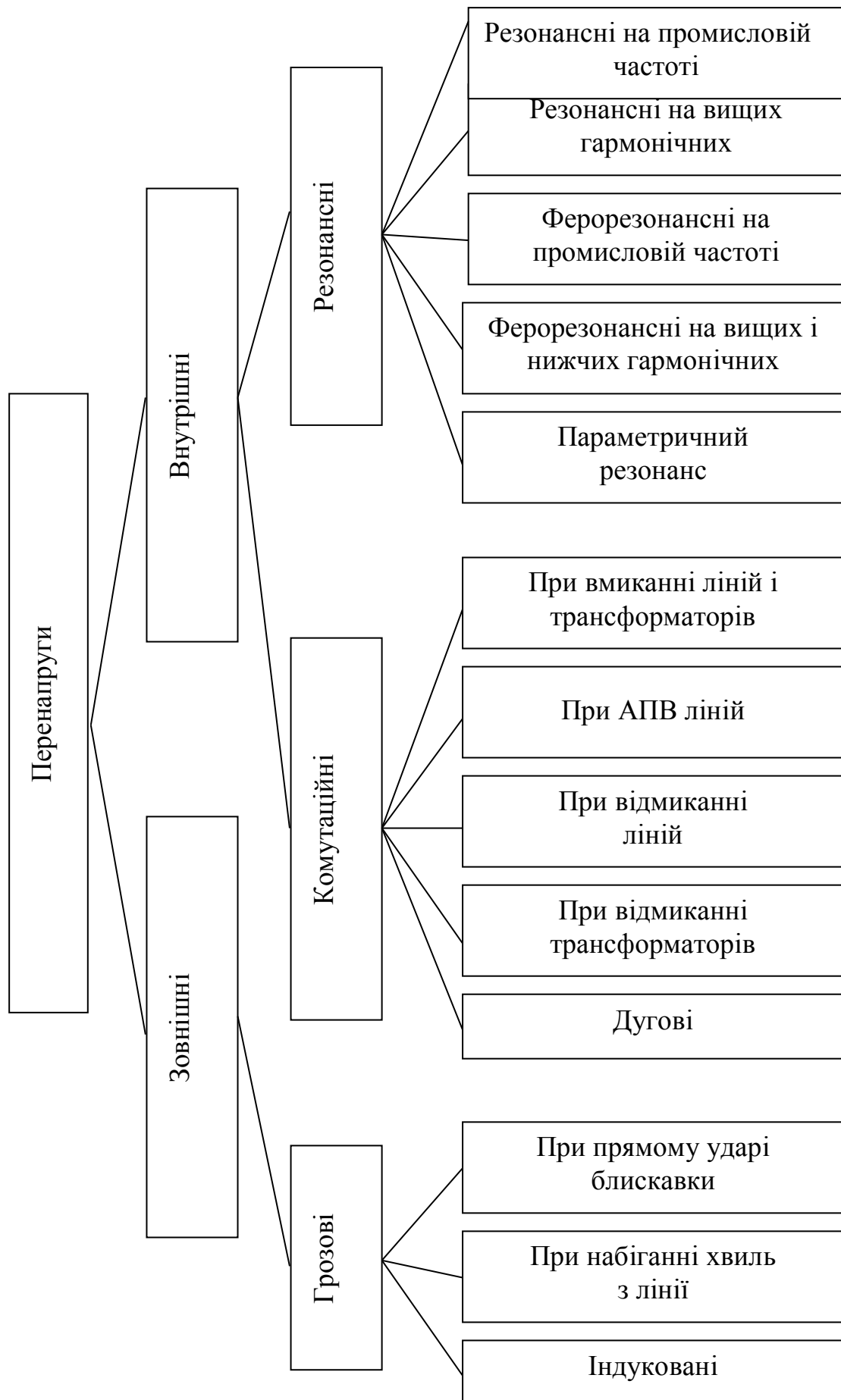


Рис. 6.1. Основні види перенапруг в мережах високої напруги

Атмосферні перенапруги виникають у результаті ударів блискавки в землю або наземні об'єкти. Розрізняють такі види атмосферних перенапруг:

- перенапруги прямого удару блискавки, обумовлені протіканням струму блискавки безпосередньо через уражений об'єкт; величина таких перенапруг може досягати 10000 кВ і більше;
- індуковані перенапруги, які з'являються в проводах при різкій зміні електромагнітного поля в момент протікання струму блискавки поблизу від проводів. Амплітуда індукованих перенапруг рідко перевищує 700 кВ;
- хвилі перенапруг, що набігають з ліній на підстанцію.

## **6.2. Внутрішні перенапруги. Загальні відомості про них**

Уже відзначалось, що внутрішні перенапруги породжуються коливаннями електромагнітної енергії, запасеної всередині електричної системи. Причиною появи внутрішніх перенапруг можуть бути нормальні й аварійні комутації електроустановок, різні аварійні режими (дугові замикання, обриви проводів і т.п.), а також відхилення параметрів електроустановок (головним чином індуктивностей і ємностей) від номінальних значень.

Внутрішні перенапруги можна розподілити на два класи:

- комутаційні, які виникають при вмиканнях і відмиканнях елементів системи у нормальних та аварійних режимах;
- резонансні (квазістаціонарні), обумовлені наявністю в енергосистемах індуктивностей та ємностей.

Часто комутаційні і резонансні перенапруги виникають одночасно, і тоді кажуть про комбіновані перенапруги. Комбіновані перенапруги можуть виникнути, наприклад, при комутаціях ненавантаженої ЛЕП: при певному співвідношенні ємності лінії та індуктивності трансформатора утворюється LC- контур, коливання в якому накладаються на звичайні в цьому випадку комутаційні перенапруги.

Основними параметрами, які характеризують внутрішні перенапруги, є їх кратність і тривалість. Багаторічний досвід

експлуатації електричних систем показав, що тільки в окремих випадках кратність внутрішніх перенапруг може перевищувати  $(3-3,5)U_{\phi}$ .

Тривалість внутрішніх перенапруг змінюється в дуже широких межах. Так, тривалість комутаційних перенапруг визначається тривалістю перехідних процесів при комутаціях і лежить в межах від кількох мілісекунд до декількох сотих секунди. Резонансні перенапруги за своєю сутністю є усталеними коливаннями в системі і можуть існувати необмежено довго. Таким чином, тривалість внутрішніх перенапруг набагато перевищує тривалість атмосферних, що й обумовлює необхідність рахуватись з ними.

Величина внутрішніх перенапруг залежить від великої кількості факторів, часто випадкових, урахувати які при теоретичному розгляді питання досить важко. Тому хоч теоретичні дослідження і ведуться, але основні рішення щодо обмеження кратності внутрішніх перенапруг приймаються на підставі дослідних даних. Обробка цих даних дозволяє зробити ряд важливих висновків як про можливу кратність і тривалість внутрішніх перенапруг, так і про ймовірність їх виникнення.

Вивчення причин виникнення внутрішніх перенапруг і способів їх обмеження важливо тому, що величина внутрішніх перенапруг безпосередньо впливає на техніко-економічні показники електросистем, які дуже залежать від необхідного рівня ізоляції. Зараз в електроустановках напругою до 220 кВ рівень лінійної ізоляції визначається максимально можливою кратністю внутрішніх перенапруг, тобто рівень ізоляції вибирається вище максимально можливих для даного класу напруги величин внутрішніх перенапруг. Тому в електроустановках до 220 кВ майже не використовуються пристрої і способи обмеження внутрішніх перенапруг. Лише в мережах з ізолюваною нейтраллю застосовуються пристрої компенсації ємнісного струму для обмеження перенапруг при дугових замиканнях на землю.

В електроустановках надвисоких напруг – від 330 кВ і вище – такий підхід уже не виправданий, тому що вони стали б дуже дорогими. Тому в таких установках доводиться примусово обмежувати величину всіх типів внутрішніх перенапруг.

Величина внутрішніх перенапруг залежить від режиму нейтралі системи. У мережах з ізольованою нейтраллю рівень внутрішніх перенапруг може бути вище, ніж при глухому заземленні нейтралі, тому що однофазні замикання на землю в мережах з ізольованою нейтраллю приводять до підвищення напруги на здорових фазах до лінійної. Цим, зокрема, пояснюється необхідність компенсації ємнісного струму при дугових замиканнях на землю.

У кожному з двох класів внутрішніх перенапруг можна виділити ряд конкретних випадків. Так, резонансні перенапруги включають до себе параметричний резонанс, ферорезонансні явища на основній гармоніці, а також на вищих і нижчих гармонічних, резонансні перенапруги при несиметричних режимах роботи електричних систем і т.д. Комутаційні перенапруги поділяють на дугові, перенапруги при комутації ємнісних та індуктивних кіл тощо. Найбільш повно внутрішні перенапруги розглянуті в [17]. Тут ми обмежимося розбором кількох окремих випадків, що розкривають природу фізичних явищ, супутніх внутрішнім перенапругам в електроустановках.

### **6.3. Перенапруги при відмиканні ненавантажених ліній електропередачі**

При відмиканні ненавантаженої лінії (лінії на холостому ході) на ній залишається заряд, величина якого залежить від миттєвого значення напруги в момент відмикання. Тому така лінія може розглядатись як ємність. На рис. 6.2, а наведена однолінійна електрична схема, відповідна випадку, в якому ми зацікавлені, а на рис. 6.2, б – схема заміщення цього кола. Розглянемо процеси, що відбуваються в цій схемі при розмиканні контактів вимикача  $Q$ , і з'ясуємо умови, при яких можливе виникнення перенапруг.

Будемо вважати, що після відмикання вимикача витоку немає і весь заряд залишається на лінії. Відзначимо також, що наведена на рис. 6.2, б схема заміщення справедлива для ліній, довжина яких не перевищує десятків кілометрів: тільки у цьому

випадку лінію можна замінити зосередженою ємністю. Для довгих ліній процеси при відмиканні мають хвильовий характер і тут не розглядаються.

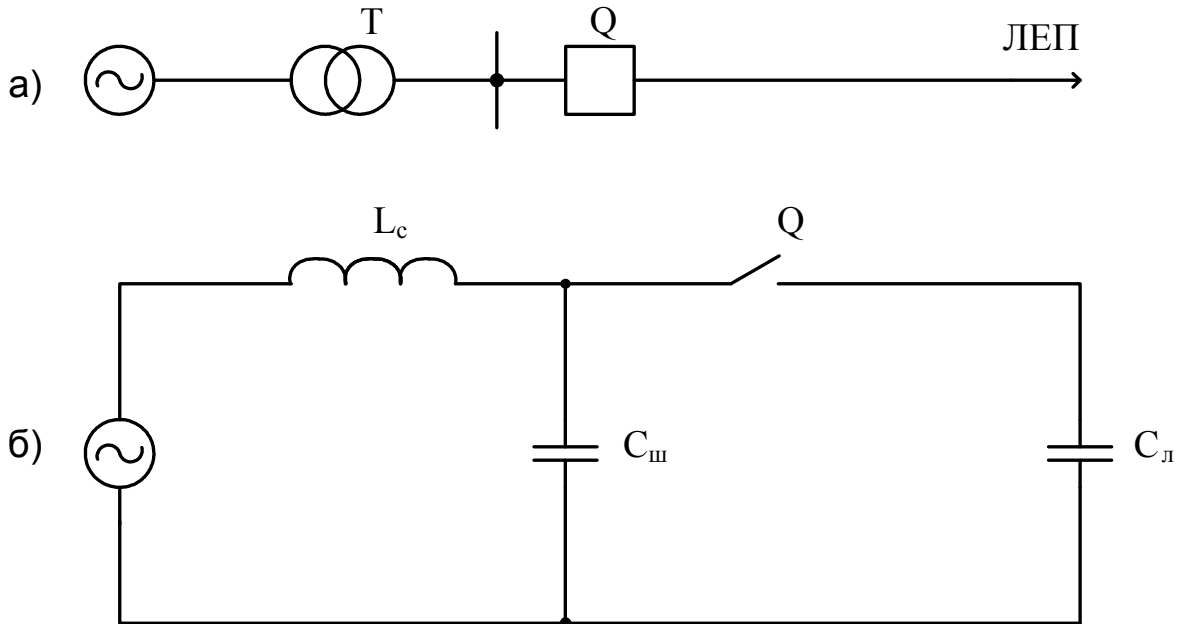


Рис. 6.2. Відмикання ненавантаженої лінії:  
 а – однолінійна електрична схема; б – схема заміщення:  
 $L_c$  – індуктивність елементів за вимикачем;  
 $C_{ш}$  – ємність шин;  $C_{л}$  – ємність лінії електропередачі

Відмикання вимикача супроводжується запалюванням дуги між контактами, що розходяться. До погасання дуги лінія залишається під'єднаною до джерела, і напруга в ній змінюється у відповідності до зміни напруги на затискачах генератора, а струм випереджує на  $90^\circ$  напругу джерела. Обрив дуги у вимикачі відбувається, як відомо, у момент проходження струму через нуль. При цьому напруга джерела, а отже, й лінії, буде максимальною і дорівнюватиме амплітудному значенню, яке ми позначимо як  $U_\phi$  (процес зміни струму і напруги на вимикачі показаний на рис. 6.3).



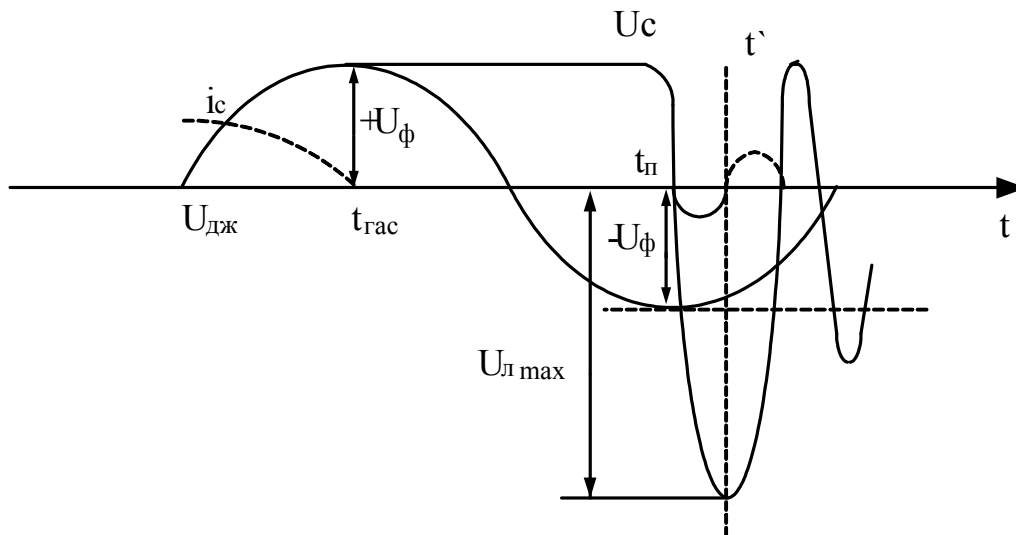


Рис. 6.3. Зміна струму і напруги на вимикачі при відмиканні ненавантаженої ЛЕП

Починаючи з моменту  $t_{гас}$  напруга на лінії залишається незмінною (тому що виток, згідно з допущенням, немає), а напруга джерела продовжує змінюватись за синусоїдним законом. При цьому до контактів вимикача виявляється прикладеною напруга  $U_k$ , що дорівнює різниці напруг джерела  $U_{дж}$  і лінії  $U_{л}$ :

$$U_k = U_{дж} - U_{л} . \quad (6.1)$$

На рис. 6.3 видно, що через півперіоду (починаючи з  $t_{гас}$ ) напруга на контактах буде дорівнювати подвоєній фазній. Може статись, що під дією цієї напруги дуга загориться знову, і тоді лінія буде підімкнена до джерела. Ємність лінії  $C_{л}$  почне перезаряджатись, прагнучи прийняти напругу джерела. Наявність у схемі індуктивності робить процес перезарядження коливальним, причому частота коливань визначається за відомою формулою

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_c \cdot (C_{ш} + C_{л})}} . \quad (6.2)$$

Ця частота в багато разів більша частоти напруги мережі, тому можна вважати, що коливання будуть відбуватись відносно напруги джерела, яка дорівнює в цей момент  $-U_{\phi}$  (кінець кінцем ємність лінії зарядиться до  $-U_{\phi}$ ). Амплітуда коливань, як це витікає з фізики явища, буде дорівнювати різниці початкової і кінцевої напруг на ємності лінії. У розглядуваному випадку амплітуда буде дорівнювати  $2U_{\phi}$ . З рис. 6.3 видно, що в результаті перезарядження ємності лінія в момент  $t'$  буде мати напругу відносно землі, що дорівнює потроєній фазній напрузі джерела

$$U_{\max}=3U_{\phi} \quad (6.3)$$

Процес перезарядження ємності лінії супроводжується протіканням через вимикач струму перезаряду  $i_{\pi}$  з частотою  $\omega$ , зсунутого на  $90^{\circ}$  по відношенню до напруги коливального процесу. Може статись, що в момент  $t'$  проходження цього струму через нуль повторна дуга погасне. У цей час лінія має напругу  $-3U_{\phi}$  і при відсутності витоків буде зберігати її незмінною. Напруга ж джерела продовжує змінюватись і через півперіоду набуде значення  $+U_{\phi}$ . Контакти вимикача опиняться під напругою  $4U_{\phi}$ , що може привести до нового запалення дуги. Якщо це відбудеться, то ємність лінії знову почне перезаряджатись, прагнучи прийняти напругу джерела  $+U_{\phi}$ . Частота коливань збережеться та ж сама, що й раніше, а амплітуда вже складе  $4U_{\phi}$ . При цьому максимальна напруга на лінії досягне величини  $5U_{\phi}$ , у чому неважко впевнитись, міркуючи аналогічно до попереднього випадку. Якщо електрична міцність проміжку між контактами вимикача відновлюється повільно і запалювання дуги буде повторюватись, то можливе підвищення напруги на лінії до  $7, 9 U_{\phi}$  і т.д. – до остаточного погасання дуги.

Таким чином, при відмиканні ненавантаженої лінії можлива поява перенапруг з кратністю більше 3. Причиною виникнення перенапруг є повторне запалювання дуги у вимикачі.

Розуміння причин виникнення перенапруг при відмиканні ненавантажених ліній і фізики процесів, що відбуваються при цьому, дозволило розробити способи і засоби обмеження таких перенапруг. Розглянемо основні з них.

1. Застосування вимикачів без повторного запалювання дуги. Промисловість випускає надійні вакуумні вимикачі і вимикачі з поздовжнім дуттям, в яких повторне запалювання дуги спостерігається надзвичайно рідко, а багаторазове запалювання взагалі виключається. Відсутність повторних запалювань гарантує відсутність перенапруг при вимиканні ліній.

Розроблений також вимикач з шунтуючим опором, принцип дії якого пояснюється рис. 6.4. Вимикач  $Q$  має дві пари контактів, ввімкнених послідовно. Розмикання контактів відбувається неодноразово: спочатку розходяться контакти 1-2, паралельно яким увімкнено шунтуючий опір  $R_{ш}$  порядку декількох кілоом (кОм). Після обриву дуги між цими контактами лінія зберігає зв'язок із джерелом через  $R_{ш}$  і тому заряд її зменшується. Потім починають розмикатись контакти 3-4 і відбувається повне відмикання лінії. Якщо дуга загориться повторно (між контактами 3-4), то процес перезарядження лінії матиме аперіодичний характер, тому що в коло перезаряду буде ввімкнений великий за величиною активний опір  $R_{ш}$ . При цьому кратність перенапруг складає лише 1,2-1,4.

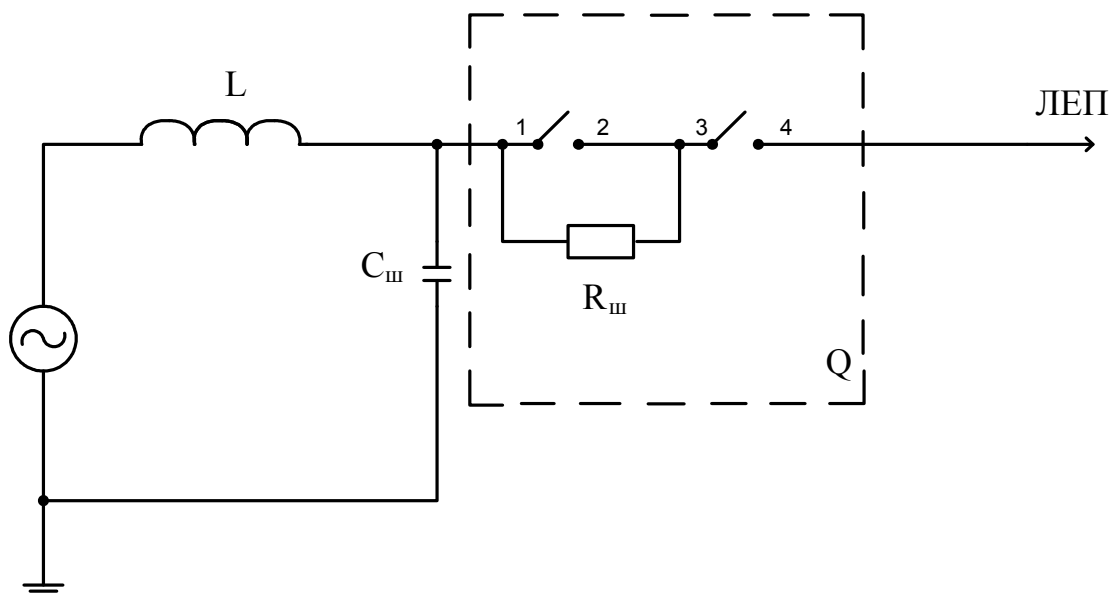


Рис. 6.4. Відмикання лінії вимикачем з шунтуючим опором

2. Відмикання лінії разом з трансформатором з боку низької напруги. Якщо вимикач поставити на боці низької напруги (рис. 6.5), то після обриву дуги в ньому лінія зберігає зв'язок із землею через трансформатор. Наявність цього зв'язку сприяє зменшенню напруги на лінії (за рахунок стікання зарядів у безструмну паузу). Тому при повторному запалюванні дуги процес перезарядження ємності лінії почнеться при напрузі меншій, ніж  $U_{\phi}$ . Отже, і амплітуда коливань, і максимальна напруга на лінії будуть нижче, ніж у випадку установлення вимикача на боці високої напруги.

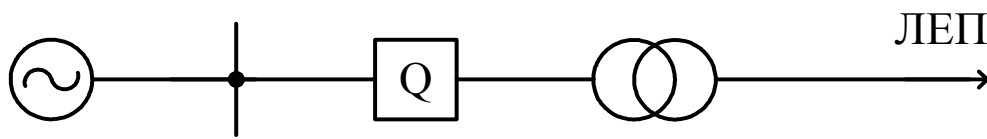


Рис. 6.5. Відмикання лінії з боку нижчої напруги

3. Застосування вентильних розрядників типу РВКМ, РВТ. Ці розрядники здатні ефективно обмежувати внутрішні перенапруги, у тому числі й перенапруги при відмиканні ненавантажених ліній електропередачі.

Наявний досвід експлуатації говорить про те, що навіть при багаторазових повторних запалюваннях дуги у вимикачі величина перенапруг на лінії не перевищує 3-4  $U_{\phi}$ , тобто обмеження перенапруг відбувається ще й природним шляхом за рахунок наявності витоків у лінії, за рахунок виникнення корони при підвищенні напруги, а також за рахунок затухання коливального процесу перезарядження ємності лінії.

Деяке зростання величини перенапруг спостерігається у тому випадку, якщо окремі фази трифазної лінії відмикаються неодноразово: за рахунок електромагнітного зв'язку фаза, яка відмикається першою, буде мати додаткову індуквану напругу, що в деяких випадках може привести до збільшення внутрішніх перенапруг.

#### 6.4. Перенапруги при відмиканні трансформаторів на холостому ході

При виведенні трансформаторів з роботи, наприклад у ремонт, спочатку відмикається навантаження, а потім вже трансформатор. Установлено, що відмикання ненавантаженого трансформатора супроводжується появою перенапруг, які являють собою небезпеку для його ізоляції. Розглянемо причини, що приводять до виникнення перенапруг. Для цього скористаємось рис. 6.6, на якому показана однолінійна схема і схема заміщення кола, відповідного розглядуваному випадку.

При розмиканні контактів вимикача між ними виникає дуга, по якій протікає струм холостого ходу  $i_{xx}$  трансформатора (струм намагнічування), що дорівнює (3-5)% номінального робочого струму. Оскільки струм  $i_{xx}$  невеликий, то ступінь іонізації дуги незначний, і вимикач у змозі погасити дугу не при нульовому струмі, а при деякому його значенні  $i_3$  (струм зрізу). Тому після обриву дуги в індуктивності трансформатора  $L_{тр}$  залишається запасена енергія

$$Q = \frac{L_{тр} \cdot i_3^2}{2}. \quad (6.4)$$

Наявність цієї енергії приводить до виникнення в контурі коливань з частотою  $\omega$ , що дорівнює

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_{тр} \cdot C_{тр}}} \quad (6.5)$$

і набагато перевищує частоту напруги джерела (50 Гц). Можна показати [13], що в найбільш несприятливому випадку максимальна напруга на трансформаторі досягає величини, яка визначається за формулою

$$U_{\max} = \sqrt{U_3^2 + i_3^2 \cdot \frac{L_{\text{тр}}}{C_{\text{тр}}}}, \quad (6.6)$$

де  $U_3$  – напруга зрізу (гасіння) дуги.

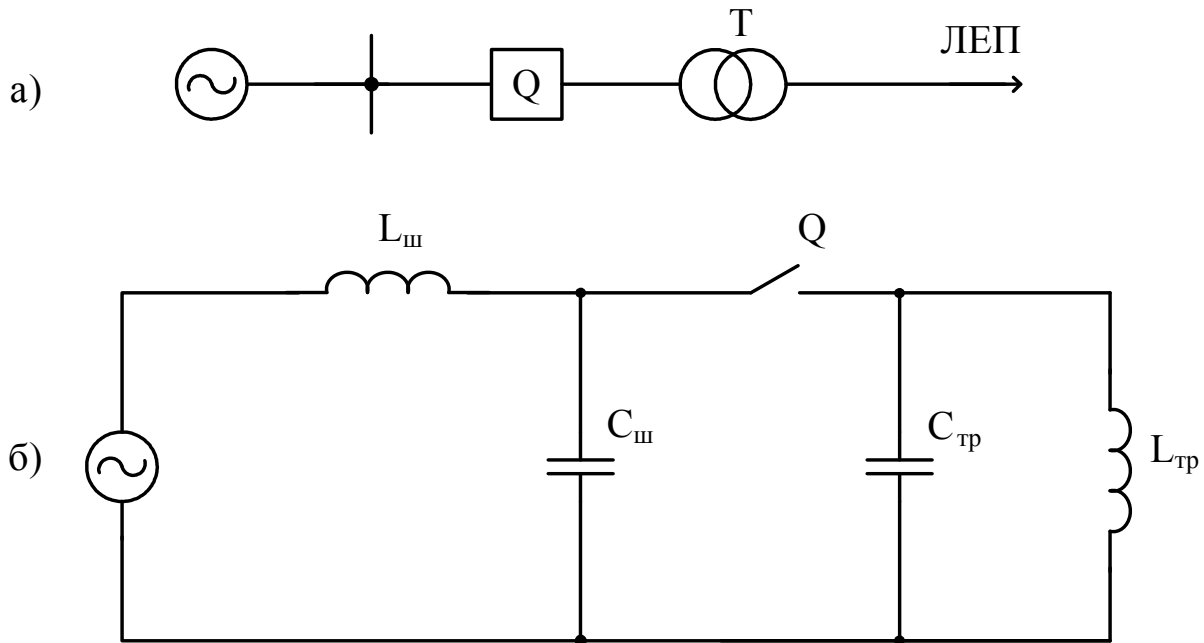


Рис. 6.6. Відмикання трансформатора на холостому ході:  
а – однолінійна електрична схема; б – схема заміщення:

$L_{\text{ш}}, C_{\text{ш}}$  – індуктивність і ємність шин;

$L_{\text{тр}}, C_{\text{тр}}$  – індуктивність і ємність трансформатора

При повторних запалюваннях дуги перенапруги можуть бути як більше, так і менше  $U_{\max}$ ; усе залежить від початкових умов, при яких дуга гаситься знову. На практиці частіше спостерігається збільшення перенапруг при багаторазовому запалюванні дуги у вимикачі. Абсолютне максимальне значення перенапруг при відмиканні трансформаторів на холостому ході складає в реальних системах (3-4)  $U_{\phi}$ . Для обмеження даного виду перенапруг використовуються такі способи:

- збільшення власної ємності трансформатора  $C_{тр}$ ; аналіз формули (6.6) показує, що при збільшенні  $C_{тр}$  амплітуда перенапруги зменшується. На практиці для збільшення  $C_{тр}$  трансформатори вмикають через кабельні вставки, які мають велику ємність;
- застосування вентильних розрядників. Запасена в трансформаторі після обриву дуги енергія порівняно невелика і тому не становить небезпеки для вентильних розрядників;
- застосування для відмикання трансформаторів вимикачів з шунтуючим опором або інших вимикачів, що не допускають багаторазового запалювання дуги;
- відмикання трансформатора з боку низької напруги; на боці низької напруги струм холостого ходу значно більший, ніж на боці високої напруги, отже, дуга іонізована сильніше і обрив її відбувається при значеннях струму, близьких до нуля.

На закінчення відзначимо, що способи і засоби захисту електроустановок від перенапруг взагалі і внутрішніх зокрема постійно вдосконалюються.

### **Контрольні питання**

1. Дайте визначення перенапруги.
2. Назвіть основні характеристики перенапруг.
3. Як класифікуються перенапруги?
4. Охарактеризуйте зовнішні та внутрішні перенапруги.
5. Як класифікуються внутрішні перенапруги?
6. Яка величина перенапруг при відмиканні навантажених ліній електропередачі і за рахунок чого вони з'являються?
7. Яка величина перенапруг при відмиканні трансформаторів на холостому ході і за рахунок чого вони з'являються?
8. Які шляхи зменшення комутаційних перенапруг?

## Розділ 7

### АТМОСФЕРНІ ПЕРЕНАПРУГИ

#### 7.1. Грози і розвиток грозового розряду

Джерелом атмосферних перенапруг є грозові розряди – блискавки, які виникають внаслідок електричного пробоя повітряних проміжків між хмарою і землею або між двома грозовими хмарами. Блискавка являє собою різновид газового розряду при дуже великій довжині іскри. Загальна довжина каналу блискавки коливається в межах від 2 до 8 км, причому значна частина цього каналу знаходиться всередині грозової хмари.

Безпосередньою причиною гроз є швидке переміщення нагрітих мас вологого повітря у верхні шари атмосфери. Конвекція повітряних мас супроводжується їх охолодженням, конденсацією парів води і утворенням грозових хмар. Грозові хмари в процесі утворення заряджаються, причому сумарний заряд хмари може бути як позитивним, так і негативним. Переважають хмари з негативним зарядом (установлено, що це буває в 70-90 % випадків). Грозові хмари являють собою об'ємні електричні заряди: крапельки води, кристалики льоду, які насичують хмару, несуть на собі електричні заряди.

Причини електризації грозових хмар повністю не з'ясовані. Жодна з існуючих теорій не може повністю пояснити всіх явищ, які спостерігаються при експериментальних дослідженнях гроз.

Розвиток грозового розряду відбувається таким чином (рис. 7.1). В окремих місцях хмари, де густина зарядів особливо велика, виникають напруженості електричного поля, які досягають критичних величин 25-30 кВ/см. При цьому від хмари до землі починає “проростати” іонізований канал, який називається лідером. Розвиток лідера відбувається ступенями. Швидкість ступеня досягає  $5 \cdot 10^9$  см/с, а час його руху 1 мкс. Отже, довжина ступенів досягає 50 м. Інтервали між ступенями лежать в межах 30-90 мкс. Канал лідера заповнюється зарядами, які мають знак, однаковий із зарядами хмари.



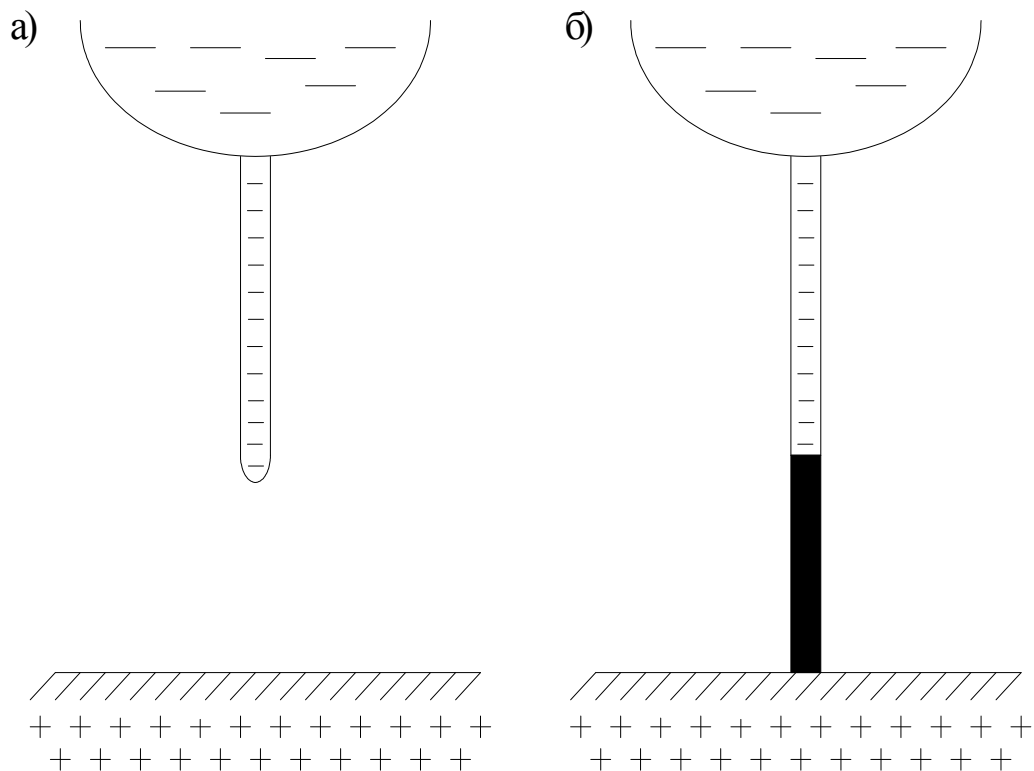


Рис. 7.1. Розвиток грозового розряду:  
 а – накопичення зарядів у лідерній стадії;  
 б – нейтралізація зарядів у стадії головного розряду

На перших стадіях розвитку лідера траєкторія його руху не пов'язана із земними об'єктами. По мірі опускання лідера все більше починають впливати накопичення зарядів на землі і об'єктах, які височаться. Починаючи з певної висоти лідера (висоти орієнтування), напруженість поля за одним з напрямів виявляється найбільшою, і відбувається орієнтування лідера на один із наземних об'єктів. Природно, що при цьому переважно уражуються об'єкти, які височаться, і ділянки землі з підвищеною провідністю.

Під дією електричного поля лідера в землі під лідером починає концентруватись заряд протилежного знаку. При наявності заземлених об'єктів, які височаться (блискавковідводи, димові труби, високі будинки), заряди стягуються до вершин об'єкта, створюючи тим значну напруженість поля. У момент досягнення лідером землі починається головний розряд, тобто процес нейтралізації надлишкового заряду лідера зарядом землі.

Саме головний розряд ми і спостерігаємо як удар блискавки – яскраву світну смугу довжиною в декілька десятків метрів. Швидкість розповсюдження головного розряду досягає 0,05-0,5 швидкості світла. Розвивається він завжди від землі до хмари.

Приблизно в половині випадків розряд блискавки є багаторазовим, який складається з кількох послідовних розрядів (у середньому кількість послідовних розрядів дорівнює трьом – чотирьом, але в окремих випадках ця кількість може досягати 40). Кожному наступному розряду передують утворення лідера на шляху першого – ступінчастого. Повторні лідери утворюються суцільним фронтом, без ступенів. Їх називають стрілоподібними.

Описана картина розвитку грозового розряду є типовою, але можливі і відхилення від неї. Спостерігались розряди блискавки безлідерні, розряди, що не досягали землі, а також розряди, при яких перший лідер був стрілоподібним.

Грози бувають двох типів:

- теплові;
- фронтальні.

Теплові грози характерні для жарких літніх днів. Виникають вони частіше всього в другій половині дня і утворюються в результаті місцевого розігріву вологого повітря. Розігрів приводить до інтенсивної вертикальної конвекції водяної пари повітря та утворення хмар.

Теплові грози охоплюють порівняно невеликі території, але переміщуються з великою швидкістю – до 100 км/год. Для них характерна велика кількість розрядів між хмарами.

Фронтальні грози утворюються на фронті потоку холодного повітря, яке витісняє нагріте. Вони займають великі території, переміщуються повільно і супроводжуються частими розрядами „хмара – земля”.

## **7.2. Діяння струму блискавки**

Грозовий розряд чинить електромагнітні, теплові і механічні діяння. З грозовим розрядом пов’язано електромагнітне поле, яке індукують напругу на проводах і провідних конструкціях поблизу місця удару. Індуковані напруги на лініях електропередачі

можуть досягати сотень кіловольт. Струм блискавки  $I_6$ , протікаючи через заземлений об'єкт з опором заземлення  $R_3$ , наприклад через опору лінії електропередачі, створює на цьому опорі спад напруги  $I_6 R_3$ . У зв'язку з великими значеннями струму блискавки спад напруги може досягати сотень і навіть тисяч кіловольт. Це перенапруги прямого удару блискавки (ПУБ).

Індуковані перенапруги і перенапруги прямого удару блискавки, об'єднані під загальною назвою атмосферних перенапруг, розповсюджуються на всі ділянки електрично зв'язаної системи.

Протікання струму блискавки зв'язано з виділенням тепла в провіднику. Розрахунки показують, що струм блискавки  $I_6$  (кА), який викликає нагрівання провідника до температури плавлення або випаровування, визначається за формулою

$$I_6 = K \frac{F}{\sqrt{\tau_{хв}}}, \quad (7.1)$$

де  $K$  - коефіцієнт, значення якого складає для міді 300-330, для алюмінію – 200-230;

$F$  - переріз провідника, мм<sup>2</sup>;

$\tau_{хв}$  - довжина хвилі (імпульсу), мкс.

Практично з тепловим ефектом струму блискавки слід рахуватись лише при використанні провідників малого перерізу, наприклад у плавких запобіжниках.

Деяку більшу небезпеку являє собою виплавлення металу в місці стикання з каналом блискавки, температура якого дуже висока. Потужні грозові розряди можуть привести до виплавлення металу на глибину декількох міліметрів.

Механічні діяння струму блискавки виявляються через розщеплення дерев, руйнування невеликих кам'яних будівель, мурованих труб, незахищених блискавковідводами тощо. На лініях електропередачі спостерігаються розщеплення дерев'яних стояків і траверс опор. Механізм цього розщеплення такий: струм блискавки, протікаючи по волокнах дерева, приводить до переміщення ниток каналу іскри і вибухоподібного

випаровування вологи, яка міститься в деревині. Із стовпа виринаються тріски довжиною до декількох метрів.

Механічне діяння струму блискавки пов'язане також з електростатичними силами, що виникають між зарядами в діелектрику, які залишаються після проходження струму блискавки. Ці сили мають ударний характер і приводять до руйнування кам'яних і мурованих будівель.

Струм блискавки, протікаючи через вузькі канали і щілини, викликає значні розривні зусилля. Цей ефект суттєвий для трубчатих розрядників, де струм блискавки протікає в каналі 6-24 мм. Критичні значення струму, що приводять до руйнувань розрядників, залежать від діаметра каналу і міцності трубки по відношенню до ударних навантажень.

### **7.3. Основні параметри блискавки. Інтенсивність грозової діяльності**

Величина атмосферних перенапруг визначається основними електричними параметрами блискавки. До цих параметрів належать:

- амплітуда струму блискавки  $I_b$ , кА;
- крутість фронту хвилі струму  $a$ , кА/мкс;
- тривалість фронту хвилі струму  $\tau_f$ , мкс;
- тривалість імпульсу хвилі струму  $\tau_{хв}$ , мкс.

Усі перелічені параметри визначаються експериментально. Масові вимірювання струму блискавки показали, що величина  $I_b$ , коливається в межах від декількох кілоампер до сотень кілоампер, причому імовірність появи струмів блискавки з різною амплітудою неоднакова: більшим струмам відповідають менші імовірності їх виникнення. Крива імовірності амплітуд струмів блискавки подана на рис. 7.2.

По осі абсцис відкладені імовірності  $P_1$  появи струмів, що перевищують значення, указані на ординаті. Найчастіші струми блискавки до 50 кА. Струми 50-100 кА спостерігаються рідко, а струми вище 100 кА дуже рідкі і повинні враховуватись тільки при проектуванні дуже відповідальних електроустановок.

Зазначена графічна залежність добре апроксимується емпіричною формулою

$$P_I = 10^{-\frac{I_6}{60}} = e^{-\frac{I_6}{26.1}}, \quad (7.2)$$

де  $P_I$  – імовірність того, що амплітуда струму блискавки буде дорівнювати або буде більше заданого значення  $I_6$ ;

$e$  – основа натуральних логарифмів.

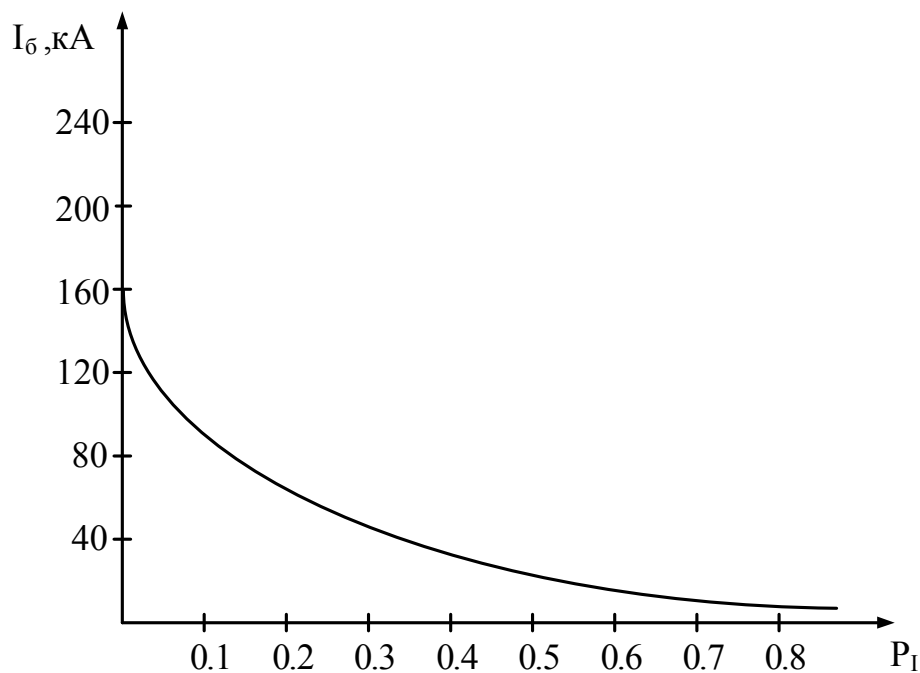


Рис. 7.2. Імовірність появи струмів блискавки різної величини

У відповідності до розподілу зарядів у грозовій хмарі струми блискавки мають переважно негативну полярність. У той же час рідкі розряди позитивної полярності досягають інколи дуже великої сили. Це може бути пояснено великою густиною позитивних зарядів у грозовій хмарі та умовами проростання позитивно зарядженого лідера.

Важливою характеристикою блискавки є крутість фронту хвилі струму блискавки

$$a = I_6 / \tau_\phi. \quad (7.3)$$

Цьому параметру приділяють велику увагу, тому що відома більша небезпечність для ізоляції електроустановок хвиль з крутим фронтом, ніж пологих.

Ймовірність появи хвиль струмів з різною крутістю підкоряється залежності, яка може бути описана формулою

$$P_a = 10^{-\frac{a}{36}}. \quad (7.4)$$

Порівняння даних сумісних вимірювань [18]  $I_6$  і  $a$  показало, що крутості й амплітуди струмів блискавки статистично зовсім слабо пов'язані між собою. Спостерігались великі струми з малою крутістю і навпаки. Гранична зареєстрована на цей час крутість фронту хвилі струму дорівнює 50 кА/мкс.

Тривалість хвилі струму може змінюватись в межах від декількох мікросекунд до кількох десятків мікросекунд, але в більшості випадків розряд триває близько 40 мкс. Тому як розрахункова приймається хвиля з  $\tau_{хв} = 40$  мкс. Тривалість фронту хвилі струму  $\tau_f$ , згідно з результатами спостережень, коливається в невеликих границях відносно середнього значення, що дорівнює 1,5 мкс.

Для обґрунтованого рішення питання про грозозахищеність електроустановок необхідно мати відомості про інтенсивність грозової діяльності в даній місцевості.

Інтенсивність грозової діяльності прийнято характеризувати кількістю грозових днів за рік або загальною річною тривалістю гроз у годинах. Остання характеристика більш правильна, тому що кількість ударів блискавки в землю залежить не від кількості гроз, а від їх загальної тривалості.

Число грозових годин за рік  $N_{гр}$  визначається як добуток кількості грозових днів у році  $n$  на тривалість одного грозового дня  $T$ , що приймається такою, яка дорівнює 1,5 - 2 год:

$$N_{гр} = nT. \quad (7.5)$$

Для більшої частини території України число грозових годин за рік дорівнює 60 - 80. Тільки в районах Донбасу і Західної України воно складає 80 - 100, причому в Західній

Україні є місцевості, де воно більше 100. Значення числа грозових днів визначають за кілька років спостережень у даному районі.

Нарешті, необхідно знати частоту уражень розрядами блискавки земної поверхні. За наявними даними, у рівнинних районах з числом грозових годин у році, що дорівнює 30, середнє число розрядів блискавки в 1 км<sup>2</sup> поверхні землі на 1 грозову годину дорівнює 0,067. Ці дані, що дозволяють оцінити частоту уражень блискавкою різних об'єктів, будуть використані в наступних розділах.

#### 7.4. Розрахунок індукованих перенапруг

Індуковані атмосферні перенапруги в лініях електропередачі і контактних мереж виникають при ударах блискавки поблизу них. Індуковані перенапруги можна розглядати як такі, що складаються з електричної та магнітної складових.

Величина електричної складової індукованої перенапруги визначається виразом

$$U_{\text{інд.ел.}} = K_{\text{ел.}} (h_{\text{ср}}/S) I_{\text{б}}, \quad (7.6)$$

де  $K_{\text{ел.}}$  – коефіцієнт, що має розмірність опору і залежить від швидкості руху зарядів по каналу блискавки; із збільшенням швидкості зарядів його величина зменшується;

$h_{\text{ср}}$  – середня висота підвісу проводів:  $h_{\text{ср}} = h - \frac{2}{3}f$ ;

$h$  – висота підвісу проводів на опорі;

$f$  – стріла провисання;

$S$  – відстань від провода ЛЕП або контактної мережі до місця ПУБ;

$I_{\text{б}}$  – струм блискавки.

Магнітна складова індукованої перенапруги формується під час швидкої зміни магнітного поля, утвореного струмом блискавки. Її максимальне значення визначається виразом

$$U_{\text{інд.м}} = K_{\text{м}} (h_{\text{ср}}/S) I_{\text{б}}, \quad (7.7)$$

де  $K_{\text{м}}$  – коефіцієнт пропорційності, який зростає із збільшенням швидкості руху зарядів по каналу блискавки.

Максимальне значення індукованих перенапруг дорівнює сумі електричної і магнітної складових:

$$U_{\text{інд}} = U_{\text{інд.ел}} + U_{\text{інд.м}} = (K_{\text{ел}} + K_{\text{м}})(h_{\text{ср}}/S) I_{\text{б}}. \quad (7.8)$$

Величини коефіцієнтів  $K_{\text{ел}}$  і  $K_{\text{м}}$  змінюються в протилежні боки при різних швидкостях руху зарядів по каналу блискавки. Тому їх суму можна вважати сталою величиною, що дорівнює 30 Ом, тоді максимальна індукована перенапряга визначається за формулою

$$U_{\text{інд}} = 30(h_{\text{ср}}/S) I_{\text{б}}. \quad (7.9)$$

Кількість ПУБ в ЛЕП відповідає числу попадань блискавки в смугу земної поверхні шириною  $6h_{\text{ср}}$ . При відстанях  $S \leq 3h_{\text{ср}}$  від осі лінії відбуваються ПУБ в провід, а при відстанях  $S > 3h_{\text{ср}}$  – в землю, викликаючи тим самим індуковані перенапруги.

Наведені дані про величини атмосферних перенапруг, особливо перенапруг прямого удару блискавки, свідчать про те, що нормальна експлуатація електроустановок можлива лише при наявності грозозахисних засобів, які б виключали прямі удари блискавки в елементи системи або обмежували перенапруги до рівнів, безпечних для ізоляції електрообладнання.

## **7.5. Поширення хвиль перенапруг вздовж проводів**

Обладнання тягових підстанцій і постів секціонування має більш низький рівень ізоляції в порівнянні з ізоляцією ліній електропередачі і контактної мережі. Разом з тим через велику протяжність цих ліній основна частка грозових перенапруг виникає в них.



Атмосферні перенапруги на лініях і підстанціях визначаються рухом і заломленням цих хвиль. Тому аналіз хвильових процесів при розрахунках пристроїв грозозахисту має принципово важливе значення.

Хвильовий процес на лінії виникає при будь-якому електромагнітному збуренні, наприклад, при вмиканні ліній на джерело напруги, відмиканні лінії, короткому замиканні, ураженні лінії грозовим розрядом. Хвильовий процес супроводжується втратами енергії на нагрів провідників і корону. Але в практичних розрахунках цими втратами найчастіше нехтують, що дає значне спрощення.

Диференціальні рівняння хвильового процесу на лінії без втрат мають вигляд

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = L_0 \frac{\partial i}{\partial t}; \quad -\frac{\partial i}{\partial x} = C_0 \frac{\partial u}{\partial t}, \quad (7.10)$$

де  $L_0$  і  $C_0$  – індуктивність і ємність лінії на одиницю її довжини.

Розв'язанням цих рівнянь виявляються хвильові функції або хвилі напруги і струму:

$$\begin{cases} u = u^+ + u^- = F^+(x - Vt) + F^-(x + Vt); \\ i = i^+ - i^- = \frac{1}{z} F^+(x - Vt) - \frac{1}{z} F^-(x + Vt), \end{cases} \quad (7.11)$$

де  $z$  - хвильовий опір лінії без втрат,  $z = \sqrt{L_0/C_0}$  ;

$V$  - швидкість поширення хвилі,  $V = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} = \frac{c}{\sqrt{\mu \epsilon}}$  ;

$c$  - швидкість світла, що дорівнює 300 м/мкс;

$\mu$  - відносна магнітна проникність середовища, для повітря  $\mu = 1$  ;

$\epsilon$  - діелектрична проникність, для повітря  $\epsilon = 1$ .

Для кабельних ліній  $\mu = 1, \varepsilon \approx 4$ , тобто в кабелях  $V \approx 0.5c$ .

Хвиля  $u^+$  називається прямою хвилею, хвиля  $u^-$  – зворотною хвилею.

Як видно з формули (7.11), струм і напруга прямих і зворотних хвиль пов'язані співвідношенням

$$i^+ = \frac{u^+}{z} ; \quad i^- = \frac{u^-}{z} . \quad (7.12)$$

Перехід електромагнітної хвилі з лінії з хвильовим опором  $z_1$  на лінію з хвильовим опором  $z_2$  пов'язаний зі зміною її параметрів і перерозподілом енергії електричного і магнітного полів.

Для розгляду цього процесу введемо термін вузлова точка. Вузловою точкою лінії називають таку точку, в якій стрибком змінюється співвідношення між електричним і магнітним полем, тобто змінюється хвильовий опір лінії  $z_L$ .

Припустимо, що пряма електромагнітна хвиля  $u^+$ ,  $i^+$  рухається по лінії з хвильовим опором  $z_1$ , набігає на вузлову точку А (рис. 7.3), за якою хвильовий опір лінії  $z_2$ .

Зміна співвідношення між напругою і струмом при падінні хвилі на вузлову точку приводить до заломлення і відбиття хвилі. В даному випадку пряму хвилю  $u^+$ ,  $i^+$  звичайно називають падаючою хвилею, зворотну хвилю  $u^-$ ,  $i^-$  – відбитою хвилею, а напругу і струм у вузлі  $U$ ,  $i$  – заломленою хвилею.

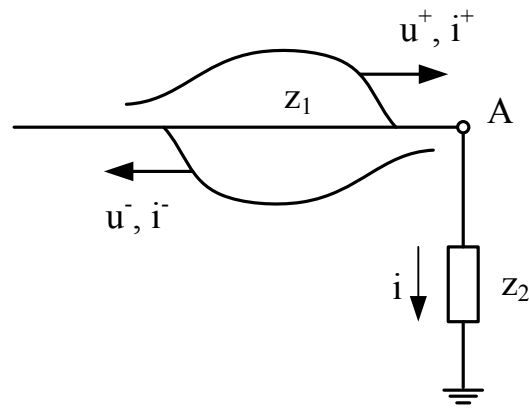
Перепишемо рівняння (7.11) у вигляді

$$u = u^+ + u^-; \quad iz = u^+ - u^-$$

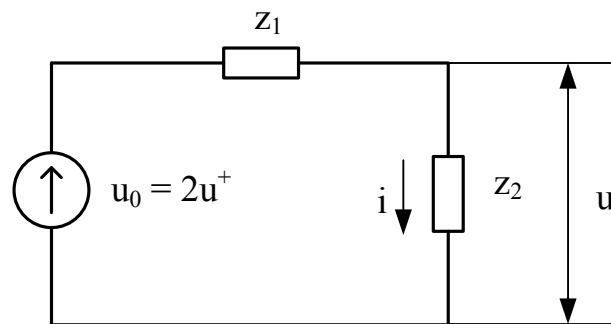
і складемо їх. Отримаємо

$$u + iz = 2u^+ . \quad (7.13)$$

Рівнянню (7.13) відповідає розрахункова схема заміщення (схема Петерсена), показана на рис. 7.3, б.



а)



б)

Рис. 7.3. До розрахунку заломленої хвилі у вузловій точці:  
а – вихідна схема; б – розрахункова схема заміщення

Напруга і струм, розраховані в цій схемі, є напругою і струмом заломленої хвилі. Знаючи заломлену напругу, можна легко визначити відбиту хвилю, використовуючи рівність  $u^- = u - u^+$ .

Зв'язок набігаючої хвилі  $u^+$  із заломленою  $u$  і відбитою  $u^-$  можна виразити через коефіцієнти заломлення  $\alpha$  і відбивання  $\beta$ :

$$u = \alpha u^+; \quad u^- = \beta u^+, \quad (7.14)$$

де коефіцієнти  $\alpha$  і  $\beta$  дорівнюють:

$$\alpha = \frac{2z_2}{z_1 + z_2}; \quad \beta = \frac{z_2 - z_1}{z_1 + z_2}. \quad (7.15)$$

Як витікає з формули (7.15),  $\alpha - \beta = 1$ .

В граничному випадку, коли лінія на кінці розімкнена ( $z_2 = \infty$ ), коефіцієнт  $\alpha = 2$  і  $\beta = 1$ ; хвиля напруги на кінці лінії відбивається зі збереженням знака, а хвиля струму – із зворотнім знаком, внаслідок чого напруга подвоюється, а струм спадає до нуля. У другому граничному випадку, коли лінія на кінці закорочувана ( $z_2 = 0$ ),  $\alpha = 0$  і  $\beta = -1$ ; хвиля напруги на кінці лінії відбивається із зворотнім знаком, а хвиля струму – із збереженням знака, внаслідок чого напруга спадає до нуля, а струм подвоюється. Отже, границі зміни  $\alpha$  лежать в межах  $0 \leq \alpha \leq 2$ , а  $-1 \leq \beta \leq +1$ .

### Контрольні питання

1. Назвіть джерело атмосферних перенапруг і охарактеризуйте його.
2. Назвіть причини гроз.
3. Опишіть картину розвитку грозового розряду.
4. Назвіть типи гроз і охарактеризуйте кожен з них.
5. Перелічіть діяння струму блискавки.
6. Охарактеризуйте електромагнітне діяння струму блискавки.
7. Охарактеризуйте тепловий ефект струму блискавки.
8. Дайте характеристику механічному діянню струму блискавки.
9. Назвіть основні параметри блискавки.
10. Чим характеризується інтенсивність грозової діяльності в даній місцевості?
11. Чому дорівнює число грозових днів за рік для більшої частини території України?
12. Як визначається максимальна індукована перенапруга?
13. Коли виникає хвильовий процес на лінії?
14. Яка хвиля називається прямою, а яка – зворотною?
15. Яку точку називають вузловою?
16. Дайте визначення коефіцієнтів заломлення і відбиття.
17. Охарактеризуйте граничні випадки для лінії ( $z_2 = \infty$  або  $z_2 = 0$ ).

## Розділ 8

# ЗАХИСТ ВІД ПРЯМИХ УДАРІВ БЛИСКАВКИ

### 8.1. Грозозахист будинків і споруд

Захист будинків і споруд від прямих ударів блискавки (ПУБ) проводиться блискавковідводами.

Призначення блискавковідводів – сприйняти переважну кількість ударів блискавки в межах захищеної території і відвести струм блискавки в землю.

Кожний блискавковідвід складається з блискавкоприймача, що височіє над захищуваним об'єктом, заземлювача і струмовідводу, який з'єднує блискавкоприймач із заземлювачем. За типами блискавкоприймачів розрізняють стержневі і тросові блискавковідводи.

Стержневі блискавковідводи виконуються у вигляді вертикально встановлених стержнів, з'єднаних із заземлювачем, а тросові – у вигляді горизонтально підвішених тросів. Металевий стержневий блискавковідвід або опора одночасно виконують функції струмовідводу. Якщо ж блискавкоприймач блискавковідводу розташований на ізолюючій опорі, то він повинен бути металічно з'єднаний із заземлювачем.

Захист будинків і споруд від ПУБ проводиться, як правило, стержневими блискавковідводами. Іноді використовуються й тросові блискавковідводи, але основне їх призначення – грозозахист повітряних ліній електропередачі.

Захисна дія блискавковідводів заснована на явищі вибіркового ураження блискавкою високих об'єктів. Добре заземлений блискавковідвід є немовби продовженням землі, виступом на її поверхні, ближче всього розташованим до хмари. На цей виступ і орієнтується канал блискавки.

Висота над поверхнею землі, досягнувши якої лідер каналу блискавки неминуче уражає блискавковідвід, називається висотою орієнтування блискавки  $H$  (рис. 8.1). Установлено, що для блискавковідводів з висотою  $h \leq 30$  м  $H = 20h$ , а для блискавковідводів з висотою  $h > 30$  м висоту орієнтування приймають такою, що дорівнює 600 м.

Якщо поблизу блискавковідводу розташувати нижчий захищений об'єкт, то при певній відстані між блискавковідводом і об'єктом розрядна напруга проміжку лідер – об'єкт буде завжди більше розрядних напруг проміжків лідер – блискавковідвід і лідер – земля. Тобто навколо кожного блискавковідводу є певних розмірів зона, попадання блискавки в межах якої практично виключається (всі розряди прийме на себе блискавковідвід). Ця зона отримала назву зони захисту блискавковідводу.

Об'єкти, що знаходяться в межах цієї зони, надійно захищаються від ПУБ.

Необхідною умовою надійного захисту є якісне заземлення блискавковідводу, тому що при ударі блискавки в погано заземлений блискавковідвід на ньому утворюється дуже висока напруга, здатна викликати пробій з блискавковідводу на захищений об'єкт.

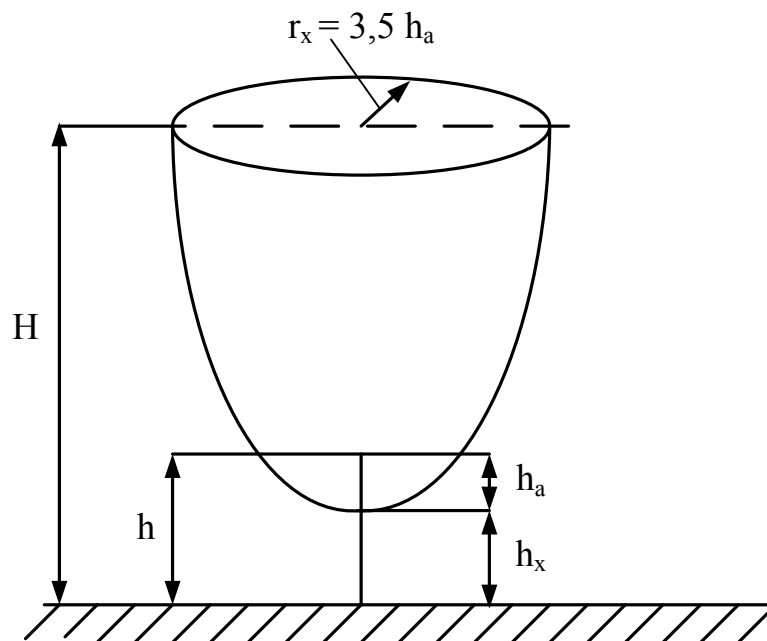


Рис. 8.1. Зона 100%-го ураження стержневого блискавковідводу

У залежності від ступеня грозонебезпеки та необхідних заходів захисту будинки і споруди поділяються на 3 категорії.

До першої категорії належать будинки (споруди), в яких є речовини, здатні вибухати від електричної іскри (наприклад, сховища порохів, бензину і т.п.).

До другої категорії належать будинки, в яких вибухонебезпечні речовини та суміші зберігаються в закритому стані, коли виникнення електричної іскри в приміщенні не тягне за собою вибуху (снаряди, міни, бомби).

Будинки і споруди, для яких ПУБ являє собою небезпеку тільки у відношенні пожежі або механічних руйнувань, належать до третьої категорії.

Захист від ПУБ будинків і споруд I категорії виконується стержневими і тросовими блискавковідводами, які стоять окремо від цих споруд. Захист таких споруд від перенапруг за рахунок електростатичної індукції виконується шляхом заземлення всіх металевих корпусів обладнання та електроапаратів, встановлених у будинках, що захищаються, з опором розтікання не більше 10 Ом.

Захист від перенапруг за рахунок електромагнітної індукції виконується для протяжних металевих предметів (трубопроводи, оболонки кабелів). У місцях їх взаємного зближення на відстані 10 см і менше через кожні 20 м довжини на паралельних кабелях і трубопроводах ставлять металеві перемички.

Захист від ПУБ будинків і споруд II категорії виконується одним із таких способів :

- стержневими або тросовими блискавковідводами, які розташовані окремо або встановлені на будинках, що захищаються;
- блискавкоприймальною захисною сіткою, яка накладається на неметалеву покрівлю, з розміром чарунок 6 на 6 м;
- заземленням металеві покрівлі.

Захист від перенапруг за рахунок усіх видів індукції виконується так само, як і для споруд I категорії.

Захист від ПУБ будинків III категорії виконується аналогічно захисту будинків II категорії, але при цьому блискавкоприймальна сітка має розмір чарунок 12 на 12 м або 6 на 24 м, а величина опору заземлення підвищується до 20 Ом.

Захист від вторинних діянь блискавки для будинків III категорії не потрібний.

## 8.2. Розрахунок допустимої відстані між блискавковідводом та об'єктом, що захищається

Якщо будинок чи споруда захищається блискавковідводом, що стоїть окремо, то необхідно дотримуватись певної відстані між ними. Блискавковідвід, розташований надто близько до захищуваного об'єкту, небезпечний в тому розумінні, що при ударі блискавки може відбутись зворотнє перекриття з блискавковідводу на об'єкт.

Така небезпека виникає у зв'язку з тим, що при протіканні струму блискавки по блискавковідводу на ньому утворюється спад напруги, що залежить від опору заземлення  $R_3$  та індуктивного опору блискавковідводу  $X_i$ . Величина індуктивного опору визначається індуктивністю  $L$  блискавковідводу і крутістю фронту хвилі струму блискавки  $a$ . Оскільки  $L$  залежить від висоти блискавковідводу, то й спад напруги на індуктивному опорі буде прямо пропорційний висоті. При цьому точки блискавковідводу, розташовані вище від землі, будуть мати більш високий потенціал.

На рис. 8.2 показане взаємне розміщення блискавковідводу висотою  $h$  і захищуваного об'єкта висотою  $h_x$ . Оскільки всяка точка будинку має потенціал землі, а потенціали точок блискавковідводу при протіканні по ньому струму блискавки зростають із збільшенням висоти, то найбільша різниця потенціалів між будинком і блискавковідводом буде в точках а-б тобто на рівні  $h_x$ . Числове значення цієї різниці потенціалів (позначимо її  $U_{hx}$ ) можна визначити, якщо відомі величини струму блискавки  $I_6$ , опору заземлення  $R_3$ , крутості фронту хвилі  $a$  та індуктивного опору  $L_{hx}$  ділянки блискавковідводу від рівня землі до висоти  $h_x$ . Величину  $L_{hx}$  виражають звичайно через погонну (питому) індуктивність  $L_0$  і висоту :  $L_{hx} = L_0 h_x$ . Тоді

$$U_{hx} = I_6 R_3 + a L_0 h_x. \quad (8.1)$$

Для запобігання зворотньому перекриттю необхідно вибрати проміжок  $S_n$  між точками а і б (рис. 8.2) таким, щоб виконувалась умова



$$S_{\text{п}} \geq \frac{U_{\text{hx}}}{E_{\text{доп.п.}}}, \quad (8.2)$$

де  $E_{\text{доп.п.}}$  – допустима напруженість поля для повітря, що приймається такою, яка дорівнює 500 кВ/м.

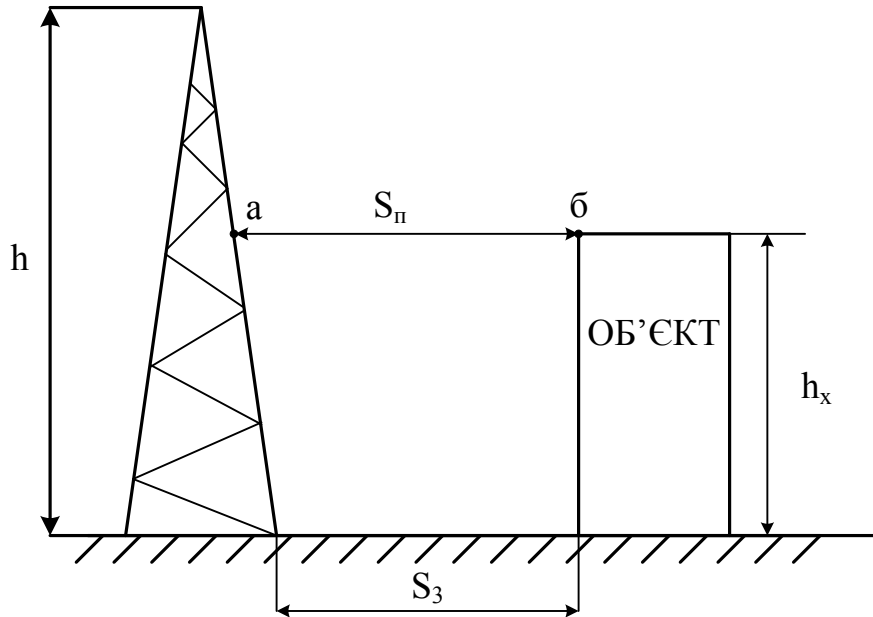


Рис. 8.2. До визначення допустимої відстані між блискавковідводом і об'єктом, що захищається

Оскільки величини  $I_6$ ,  $a$  можуть змінюватись в широких межах, то розрахунки ведуть виходячи з максимальних значень цих параметрів:  $I_6 = 150$  кА;  $a = 32$  кА/мкс;  $L_0$  приймають для всіх блискавковідводів такою, що дорівнює 1,5 мкГн/м.

Підставивши тепер у (8.2) значення  $U_{\text{hx}}$  з (8.1) і числові значення параметрів  $I_6$ ,  $a$ ,  $L_0$ , одержимо

$$S_{\text{п}} \geq \frac{I_6 R_3}{E_{\text{доп.п.}}} + \frac{L_0 a h_x}{E_{\text{доп.п.}}} \approx 0,3 R_3 + 0,1 h_x. \quad (8.3)$$

Приклад.  $R_3 = 20$  Ом,  $h_x = 10$  м,  $S_{\text{п}} = 0,3 \cdot 20 + 0,1 \cdot 10 = 7$  м, тобто для запобігання зворотному перекриттю в даному випадку необхідно встановлювати блискавковідвід не ближче як 7 м від будинку.

Грунт має меншу електричну міцність, ніж повітря: допустиму напруженість поля для ґрунту  $E_r$  приймають такою, що дорівнює 300 кВ/м. Враховуючи, що потенціал  $U_3$  заземлювача при протіканні по ньому струму блискавки дорівнює  $U_3=I_6R_3$ , можна одержати формулу для допустимої відстані  $S_3$  між блискавковідводом і об'єктом в землі:

$$S_3 \geq \frac{U_3}{E_r} = \frac{I_6 R_3}{E_r} = 0,5R_3. \quad (8.4)$$

Необхідно пам'ятати, що керівні вказівки щодо грозозахисту забороняють встановлювати блискавковідводи ближче ніж 5 м від будинків (незалежно від результатів розрахунків за формулами 8.3 і 8.4).

### 8.3. Зони захисту блискавковідводів

Розміри захисної зони залежать від багатьох факторів: кількості, висоти і взаємного розташування блискавковідводів, висоти орієнтування блискавки, а також від атмосферних та геологічних умов. Дослідження на моделях, виконані у ВЕІ А.Л.Акопяном, привели до встановлення зон захисту блискавковідводів. Багаторічний досвід експлуатації блискавковідводів підтвердив надійність рекомендованих зон захисту. При проектуванні, як правило, застосовують спрощену побудову зони захисту блискавковідводів.

#### 8.3.1. Зони захисту стержневих блискавковідводів

Зона захисту поодинокого стержневого блискавковідводу (рисунок 8.3) являє собою простір поблизу блискавковідводу, обмежений поверхнею обертання у вигляді «шатра». Радіус перерізу зони захисту на висоті  $h_x$  визначають таким чином:

$$r_x = \frac{1.6h_a}{1 + h_x/h} P, \quad (8.5)$$

де  $h_x$  – рівень захисту, що розглядається (звичайно висота об'єкта, що захищається);  
 $h$  – висота блискавковідводу;  
 $h_a$  – активна висота блискавковідводу ( $h_a = h - h_x$ );  
 $r$  – поправка, приймається рівною 1 при  $h \leq 30$  м і  $\frac{5.5}{\sqrt{h}}$  при  $h > 30$  м.

Замість використання виразу (8.5) можна застосувати спрощену побудову обрису захисної зони, замінивши криволінійну твірну ламаною лінією (рис. 8.3). Один з відрізків ламаної  $ab$  є частиною прямої, що з'єднує вершину блискавковідводу з точкою на поверхні землі, віддаленої на відстань  $0,75h$  від осі блискавковідводу, а інший відрізок  $bc$  являє собою частину прямої, яка з'єднує точку блискавковідводу на висоті  $0,8h$  з точкою на відстані  $1,5h$  від блискавковідводу.

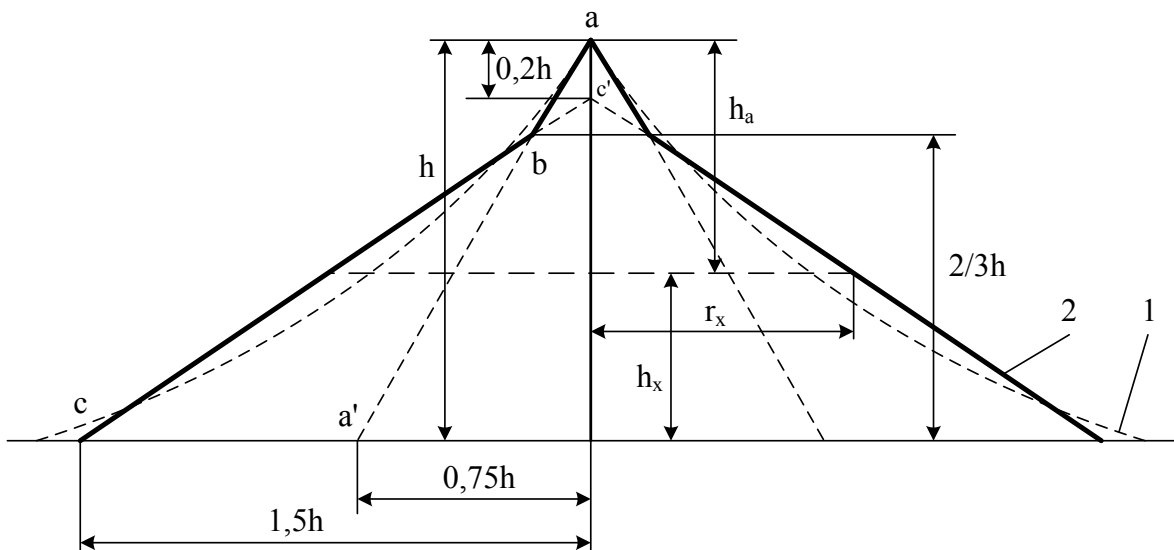


Рис. 8.3. Зона захисту стержневого блискавковідводу (1) та її спрощене побудування (2)

Ще більш спрощена будова захисної зони показана на рис. 8.4. Далі розглядаються блискавковідводи висотою  $h \leq 30$  м.

Зона захисту двох стержневих блискавковідводів має значно більші розміри, ніж сума зон захисту двох поодиноких блискавковідводів. На рис. 8.4, б зображена спільна зона захисту двох блискавковідводів однакової висоти  $h$ , коли відстань між блискавковідводами  $S \leq 7h_a$  (якщо  $S > 7h_a$ , то зони захисту слід будувати для кожного блискавковідводу окремо). Зовнішні контури зони захисту будуються так само, як і для поодиноких стержневих блискавковідводів, а внутрішня частина являє собою дугу кола, проведеного через три точки: дві з них – вершини блискавковідводів, а третя – розташована посередині між блискавковідводами на висоті  $h-S/7$ . На цьому ж рисунку показаний переріз спільної зони на висоті  $h_x$ . Величина відрізка  $b_x$  знаходиться за емпіричною формулою

$$b_x = 2r_x \frac{7h_a - S}{14h_a - S}. \quad (8.6)$$

Якщо два блискавковідводи мають різні висоти ( $h_1$  і  $h_2$ ), то для побудови їх спільної зони захисту використовують фіктивний блискавковідвід (рис. 8.4, в).

Практично зона захисту у цьому випадку будується таким чином: знаходять радіус зони захисту  $r_x$  більшого блискавковідводу на рівні, відповідному висоті  $h_1$  меншого, і отримують точку А, яка є вершиною фіктивного блискавковідводу; потім для меншого і фіктивного блискавковідводів будують спільну зону захисту так, як для двох блискавковідводів однакової висоти; зовнішні контури зони захисту будують окремо для більшого і меншого блискавковідводів.

Такі об'єкти, як відкриті розподільні устаткування підстанцій, розташовуються на достатньо великій території і тому захищаються кількома блискавковідводами. У випадку використання трьох або чотирьох блискавковідводів однакової висоти переріз їх спільної зони захисту на висоті  $h_x$  будується так, як це показано на рис. 8.5.

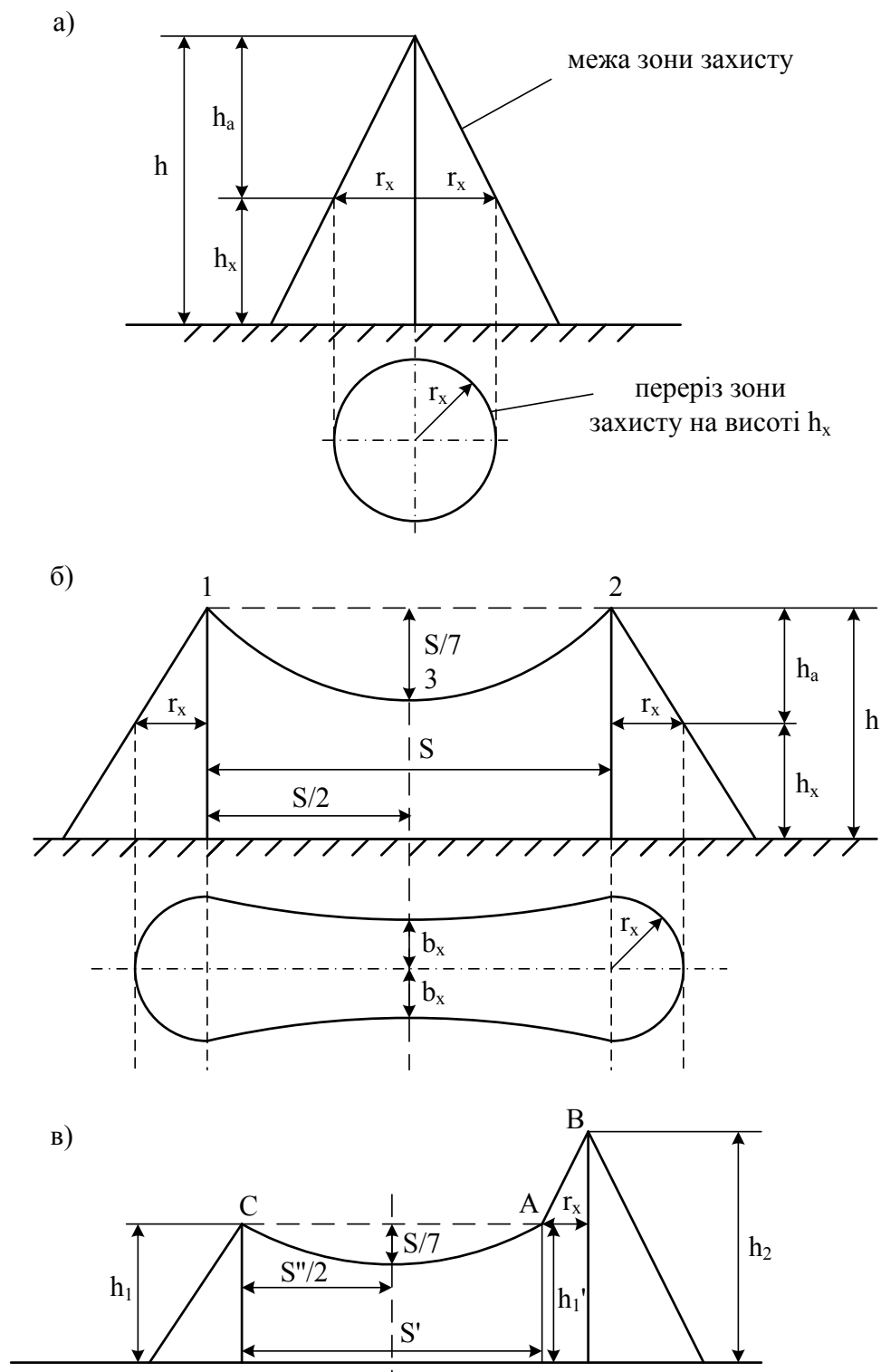
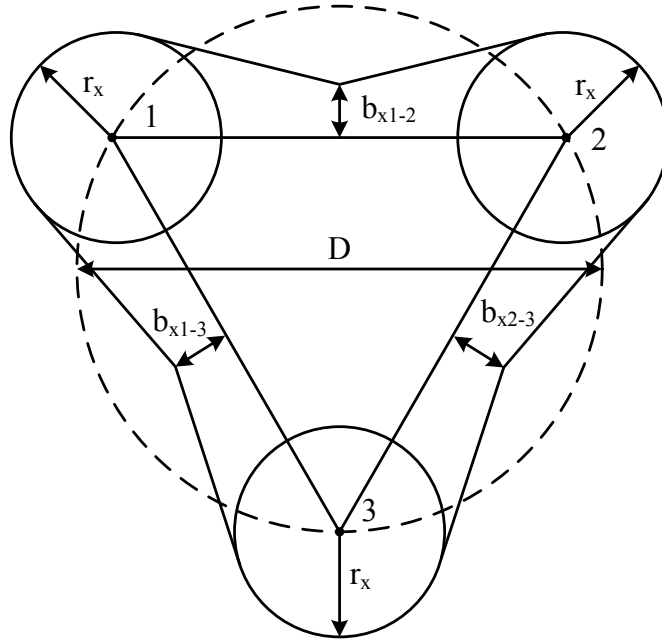


Рис. 8.4. Зони захисту стержневих блискавководів:  
 а – поодинокого; б – двох блискавководів однакової висоти;  
 в – двох блискавководів різної висоти

a)



б)

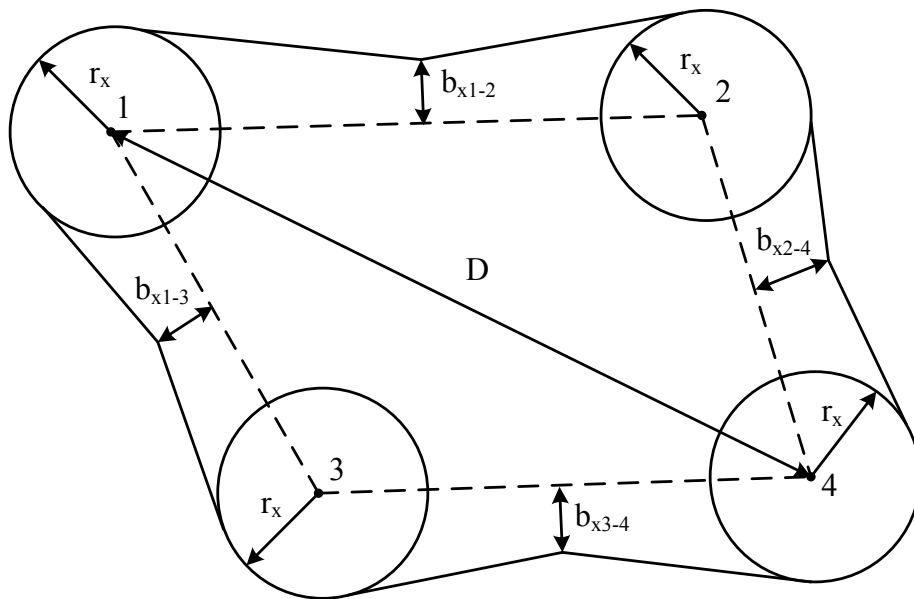


Рис. 8.5. Зони захисту трьох (а) і чотирьох (б) блискавковідводів

Зовнішні контури зони визначаються окремо для кожної пари блискавковідводів. У цьому випадку об'єкти висотою  $h_x$ , що не виступають за межі зони захисту, будуть захищені від ПУБ, якщо діаметр кола, який проходить через точки встановлення трьох блискавковідводів, або більша діагональ чотирикутника, у кутах якого знаходяться блискавковідводи, задовольняють умову

$$D \leq 8h_a. \quad (8.7)$$

При довільному розташуванні блискавковідводів умова (8.7) повинна бути перевірена для кожних трьох найближчих один до одного блискавковідводів окремо.

### 8.3.2. Зони захисту тросових блискавковідводів

Зона захисту поодинокого троса являє собою «палатку» довжиною, що відповідає довжині троса, з перерізом, показаним на рис. 8.6. Границя зони захисту на висоті  $h_x$  визначається співвідношенням

$$b_x = 2r_x = 2 \frac{1.6h_a}{1 + h_x/h} p, \quad (8.8)$$

де  $h$  – висота підвісу троса;

$h_x$  – висота підвісу проводів;

$h_a$  – активна висота троса;

$p$  – поправка, приймається рівною 1 при  $h \leq 30\text{м}$  і  $\frac{5.5}{\sqrt{h}}$  при

$h > 30\text{м}$ .

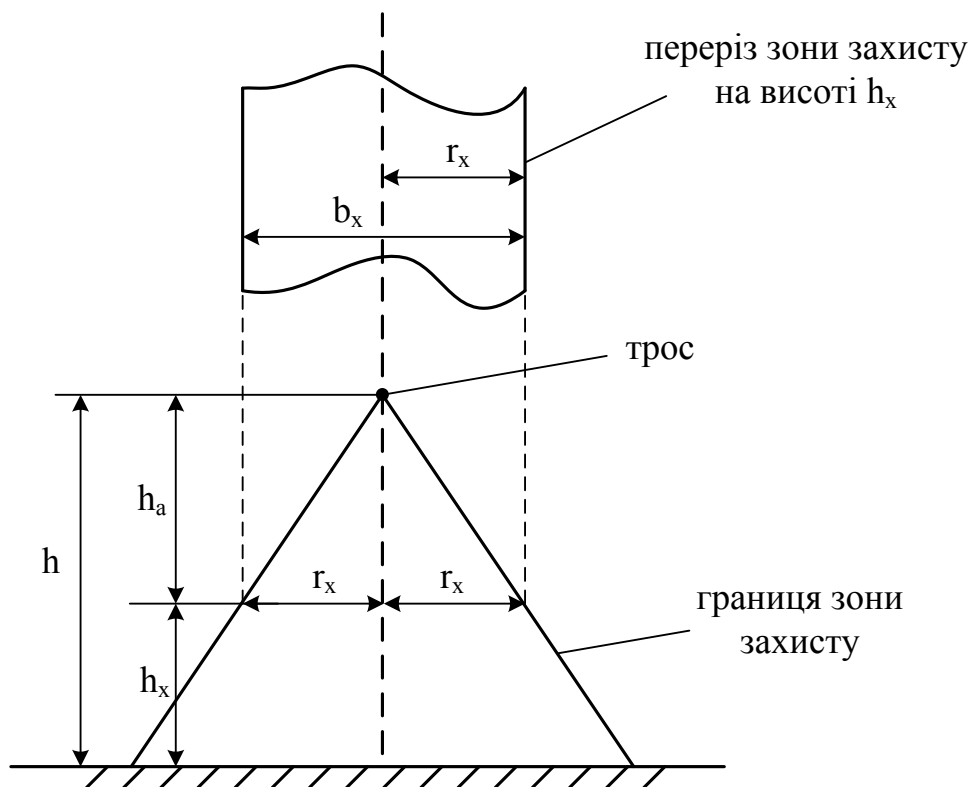


Рис. 8.6. Переріз зони захисту поодинокого троса

На ЛЕП з горизонтальним розташуванням проводів звичайно застосовують два паралельні троси. Переріз зони захисту двох тросів зображений на рисунку 8.7. Зовнішні контури зони захисту будуються так само, як для поодиноких тросів, а внутрішні – по дузі кола, проведеного через точки 1,2,3, причому ордината т.3 дорівнює  $h-S/4$  ( $S$  – відстань між тросами). Для надійного захисту від ПУБ всі проводи ЛЕП повинні знаходитись всередині зазначеної зони.

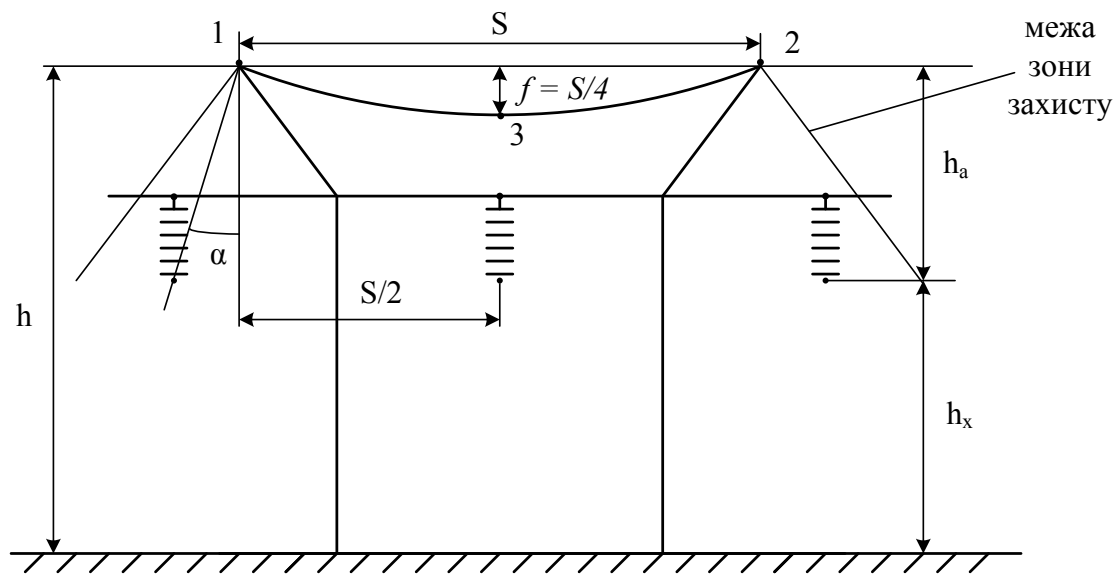


Рис. 8.7. Зона захисту двох паралельних тросів

Захисну дію тросів прийнято характеризувати кутом захисту  $\alpha$ , утвореним вертикаллю, що проходить через трос, і лінією, яка з'єднує трос з проводом (рис. 8.7). Троси тим надійніше захищають проводи, чим менший кут  $\alpha$ . Імовірність  $P_\alpha$  ураження проводів, захищених тросами із захисним кутом  $\alpha$ , або, як кажуть, імовірність прориву блискавки через тросовий захист визначається за формулою

$$\lg P_\alpha = \frac{\alpha \sqrt{h_{\text{оп}}}}{90} - 4, \quad (8.9)$$

де  $h_{\text{оп}}$  – висота опори.



Ця формула відображає основні закономірності захисту проводів тросовими блискавковідводами: імовірність прориву зростає із збільшенням кута і підвищенням висоти опор.

Кут захисту в  $30^0$  забезпечує імовірність прориву блискавки крізь трос порядку 0,002, а при  $\alpha=20^0$  практично виключається можливість прориву блискавки на провід.

Для зниження імовірності прориву блискавки зменшують захисні кути на високих опорах шляхом роздвигання тросостояків до кінців траверси; умови захисту середнього проводу при цьому звичайно зберігаються.

#### **8.4. Конструктивне виконання блискавковідводів**

Як несучі пристрої для кріплення струмовідних частин блискавковідводів повинні використовуватися там, де це можливо, конструкції самих захищуваних об'єктів. Наприклад, на підстанціях блискавкоприймачі можуть установлюватися на металевих порталах, призначених для підвішування ошиновки, а портали можуть використовуватися як струмовідводи, які з'єднують блискавкоприймачі із заземлювачем.

Для блискавковідводів, які стоять окремо, як несучі елементи (рис. 8.8) використовуються залізобетонні або дерев'яні стояки (при висоті до 20 м). Для струмовідводу використовується металева арматура залізобетонних стояків, по дерев'яних стояках прокладається спеціальний струмовідний спуск до заземлювача. При висоті більше 20 м застосовують сталеві ґратчасті конструкції. Рекомендується блискавковідводи виконувати у вигляді конструкцій, що стоять окремо без розтяжок.

Струмовідні частини блискавковідводів звичайно мають переріз близько  $50 \text{ мм}^2$  (кругла сталь діаметром 8 мм). Застосування багатодротового сталевого троса за умовами корозії не рекомендується.

Заземлення блискавковідводів звичайно виконують разом із захисним і робочим заземленням електрообладнання. Виключення складають блискавковідводи, що стоять окремо або ізольовані від будівлі, заземлювачі яких повинні бути відокремлені від захищуваного об'єкта. Ці вимоги обумовлені необхідністю виключити занесення у захищуваний об'єкт

потенціалів, які внаслідок струмів блискавки досягають великих значень і можуть стати причиною вибухів і пожеж. Для таких блискавковідводів обладнують місцевий заземлювач з двох – трьох електродів, з'єднаних сталеву штабою.

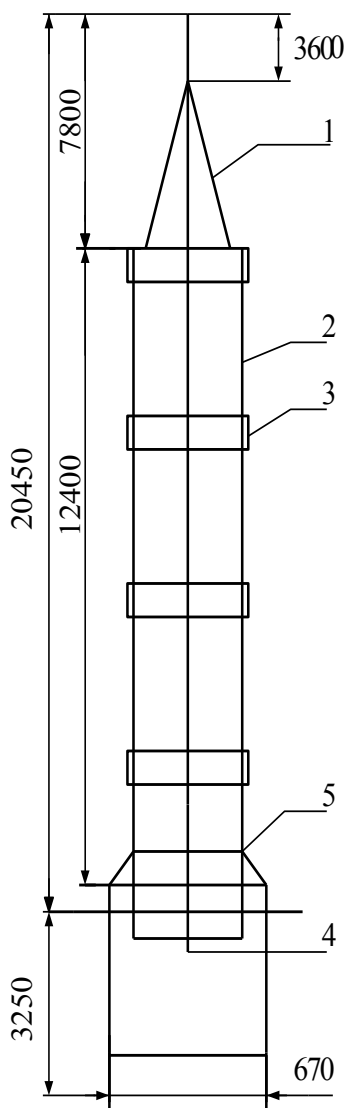


Рис. 8.8. Конструкція стержневого блискавковідводу:

- 1 – металевий блискавкоприймач;
- 2 – залізобетонна опора;
- 3 – хомути; 4 – заземлюючий спуск; 5 – залізобетонна основа

При цьому треба враховувати, що при протіканні імпульсних струмів блискавки навколо заземлювача виникає іскрова зона, обумовлена високими напруженостями електричного поля. Зона іскріння охоплює заземлювач у різному ступені в залежності від величини імпульсних струмів і тим самим мовби збільшує його геометричні розміри. Опір заземлювача при цьому зменшується. Цей ефект, що виникає при розтіканні струму блискавки, урахується так званим імпульсним коефіцієнтом  $\alpha_i$ . При цьому опір розтіканню струму при промисловій частоті  $R_{\sim}$  і опір розтіканню імпульсного струму  $R_i$  пов'язані співвідношенням

$$R_i = \alpha_i R_{\sim} \quad (8.10)$$

У практичних розрахунках для визначення імпульсного опору зосереджених заземлювачів використовуються дані, наведені в табл. 8.1.

Аналізуючи ці дані, неважко помітити, що значення імпульсних коефіцієнтів залежать від питомого опору ґрунту.

Таблиця 8.1

Зв'язок імпульсного опору заземлювачів  
з опором заземлення на змінному струмі

R <sub>i</sub> , Ом	R <sub>~</sub> , Ом		
	Глина, чорнозем	Супісок	Пісок
5	5	7,5	10
10	10	15	20
20	20	30	40
30	30	45	60
40	40	60	80

### -8.5. Робочі і захисні заземлення

Необхідною умовою ефективного грозозахисту електричних мереж, електрообладнання станцій і підстанцій є заземлення блискавковідводів, розрядників і опор ЛЕП.

Робочим заземленням називається навмисне з'єднання з землею окремих точок електричної мережі (наприклад, нейтральної точки, фази при використанні землі в якості фазного або зворотного проводу і т.п.), необхідне для забезпечення належної роботи електроустановки в нормальних або аварійних умовах. Робоче заземлення здійснюється безпосередньо або через спеціальні апарати – пробивні запобіжники, розрядники, опори і т.п.

Захисне заземлення – навмисне з'єднання з землею металевих частин обладнання, що не знаходяться під напругою в звичайних умовах, але які можуть опинитися під напругою внаслідок порушення ізоляції електроустановки. Захисне заземлення призначене для усунення небезпеки ураження людини електричним струмом при появі напруги на конструктивних частинах електрообладнання.

Будь-яке заземлення складається з заземлювача та заземлюючих провідників.

Заземлювачем називається сукупність металевих провідників, що знаходяться в стиканні із землею.

Заземлювачі бувають природними і штучними.

Під природним заземлювачем розуміють металеві частини комунікацій, будинків і споруд, що знаходяться в стиканні із землею.

Штучним заземлювачем називають заземлювач, спеціально виконаний для здійснення заземлення.

Заземлюючим провідником називається провідник, що з'єднує заземлювач з частинами обладнання, які підлягають заземленню.

Опором заземлюючого пристрою називається відношення напруги на заземлюючому пристрої до струму, що стікає з заземлювача.

Чим менший опір заземлювача, тим нижче величина напруги, що діє на ізоляцію. Опір заземлювача визначається його геометричними розмірами і характеристиками землі. Великий вплив на величину опору чинять питомий опір землі та його сезонні коливання, величина стікаючого струму і швидкість його зміни у часі.

Для розрахунку опору заземлювачів користуються приблизними значеннями питомого опору ґрунтів (табл. 8.2).

Таблиця 8.2

Приблизні значення питомого електричного опору різних ґрунтів і води, Ом·м

Ґрунт	Можливі межі коливань	Вода	Можливі межі коливань
Глина	8-70	Морська	0,2-1
Чорнозем	9-53	Струмкова	10-60
Торф	10-30	Річна	10-100
Садова земля	30-60	Ґрунтова	20-70
Суглинок	40-150	Ставкова	40-50
Супісок	150-400		
Пісок	400-700		
Кам'янистий	500-800		
Скелястий	$10^4-10^7$		

Як електроди заземлювача використовують вертикальні стержні (труби, кутову сталь), горизонтальні штаби і круглий провід, які можуть бути досить великої довжини.

Опір розтікання поодиноких заземлювачів при струмах промислової частоти визначається за наступними розрахунковими формулами.

Для вертикальної труби довжиною  $l$  і діаметром  $d$ :

- біля поверхні землі (рис. 8.9, а)

$$R_3 = \frac{\rho}{2\pi l} \cdot \ln \frac{4l}{d}; \quad (8.11)$$

- заглибленої в землю (рис. 8.9, б)

$$R_3 = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+l}{4t-l} \right), \quad (8.12)$$

де  $t_0$  – глибина залягання заземлювача від поверхні землі;  
 $t$  – відстань від поверхні землі до середини труби.

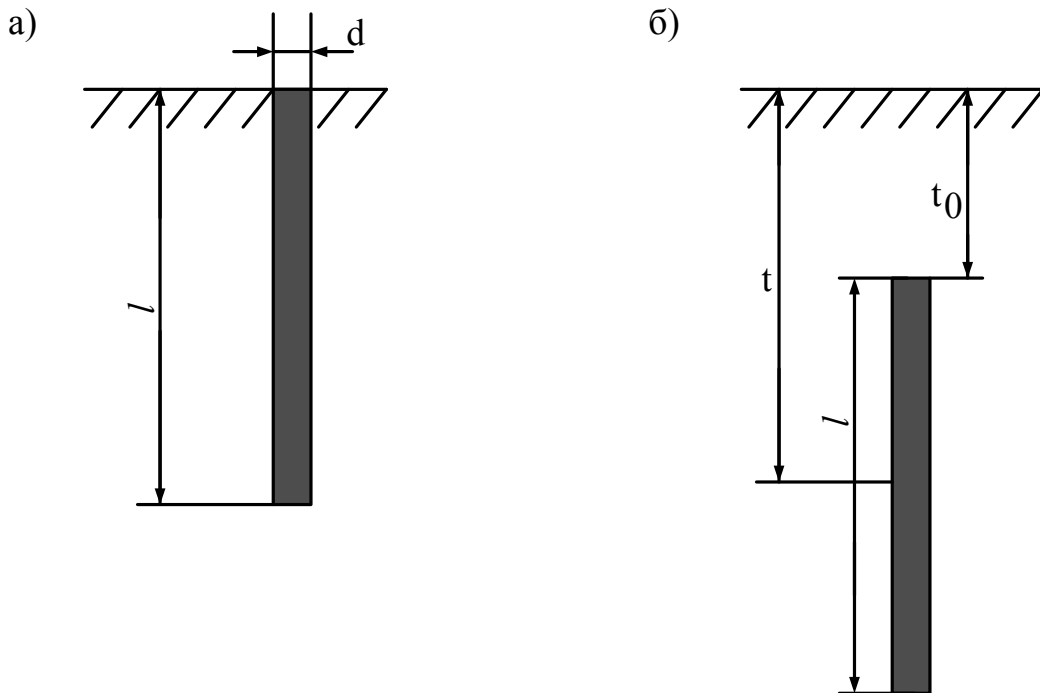


Рис. 8.9. Прості заземлювачі:

- а – заземлювач, заглиблений до рівня землі;
- б – заземлювач, заглиблений нижче поверхні землі

Для стержня з кутової сталі з шириною полиці  $v$   $R_3$  визначається біля поверхні землі за формулою (8.11), заглибленого в землю – за формулою (8.12), при цьому  $d = 0,95 v$ .

Для горизонтального штабового електрода довжиною  $l$  в землі

$$R_r = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{dt}; \quad (8.13)$$

при цьому для штаби шириною  $v$

$$d = 0,5v.$$

Опір одиночного заземлюючого електрода великий. Тому для виконання заземлювачів з малим опором використовують складні (групові) заземлювачі, що складаються із сукупності електродів обмеженої довжини, які з'єднані паралельно. Як вертикальні електроди заземлювачів використовують сталеві труби діаметром 5-6 см, кутове залізо з товщиною полиці не менше 4 мм. Широке застосування знаходять також сталеві прутки діаметром не менше 10 мм, довжиною до 10 м.

Для зв'язку вертикальних електродів і як самостійний горизонтальний електрод застосовують сталеві штаби перерізом не менше  $4 \times 12$  мм і круглу сталь перерізом діаметром не менше 6 мм.

Якщо  $n$  електродів у складі групового заземлювача однакові, а отже, однакові їх опори  $R_3$ , то опір групового заземлювача буде

$$R'_{гр} = R_3 / n. \quad (8.14)$$

Але насправді через взаємний вплив електричних полів сусідніх електродів одне на одне, опір групового заземлювача буде іншим:

$$R''_{гр} = \frac{R_3}{n\eta}, \quad (8.15)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт використання (іноді його називають коефіцієнтом екранування).

Значення  $\eta$  залежить від форми, розмірів і розташування електродів, які утворюють груповий заземлювач.

Ці міркування відносяться до вертикальних електродів групового заземлювача. Але в складі групового заземлювача є ще й горизонтальні електроди. Тому результуючий опір групового заземлювача визначається за формулою

$$R_{\text{гр}} = \frac{R_{\text{в}}R_{\text{г}}}{R_{\text{в}}\eta_{\text{г}} + R_{\text{г}}\eta_{\text{в}} \cdot n}, \quad (8.16)$$

де  $R_{\text{в}}$ ,  $R_{\text{г}}$  – опір розтіканню вертикального і горизонтального електродів;

$n$  – число вертикальних електродів;

$\eta_{\text{г}}$ ,  $\eta_{\text{в}}$  – коефіцієнти використання горизонтального та вертикальних електродів відповідно, їх значення наведені в табл. 8.3 і 8.4.

Таблиця 8.3

Коефіцієнти використання  $\eta_{\text{г}}$  горизонтального штабового електрода, який з'єднує вертикальні електроди (труби, кутники і т. ін.) групового заземлювача

Відношення відстаней між вертикальними електродами до їх довжини	Кількість вертикальних електродів							
	2	4	6	10	20	40	60	100
Вертикальні електроди, які розміщені в ряд								
1	0,85	0,77	0,72	0,62	0,42	-	-	-
2	0,94	0,80	0,84	0,75	0,56	-	-	-
3	0,96	0,92	0,88	0,82	0,68	-	-	-
Вертикальні електроди, які розміщені по контуру								
1	-	0,45	0,40	0,34	0,27	0,22	0,20	0,19
2	-	0,55	0,48	0,40	0,32	0,29	0,27	0,23
3	-	0,70	0,64	0,56	0,45	0,39	0,36	0,33

Таблиця 8.4

Коефіцієнти використання  $\eta_v$  вертикальних електродів  
групового заземлювача (труб, кутників і т. ін.)  
без урахування впливу штаби зв'язку

Відношення відстаней між вертикальними електродами до їх довжини	Кількість заземлювачів n							
	2	4	6	10	20	40	60	100
Електроди, які розміщені в ряд								
1	0,85	0,73	0,65	0,59	0,48	-	-	-
2	0,91	0,83	0,77	0,74	0,67	-	-	-
3	0,94	0,89	0,85	0,81	0,76	-	-	-
Електроди, які розміщені по контуру								
1	-	0,69	0,61	0,56	0,47	0,41	0,39	0,36
2	-	0,78	0,73	0,68	0,63	0,58	0,55	0,52
3	-	0,85	0,80	0,76	0,71	0,66	0,64	0,62

У пристроях електричної тяги електричне обладнання часто заземлюють на рейку. У свою чергу, рейкове коло має характерні особливості, які відсутні в заземлювачах звичайного виконання. Рейки розташовані на залізобетонних або дерев'яних шпалах і баластному шарі. Тому питомий опір рейка-грунт значно більший, ніж у звичайного заземлювача. При протіканні великих імпульсних струмів від ПУБ в опору контактної мережі або при спрацюванні розрядника в рейках виникають великі вихрові струми, які збільшують опір рейки.

Опір заземлення рейки в досить широкому діапазоні часу описується виразом

$$R_p = \frac{75}{1 + 1,5(t - t_p)}, \quad (8.17)$$

де  $t_p$  – час спрацювання розрядника.

Найбільші допустимі значення опору заземлення, встановлені ПУЕ [1], становлять:



- для установок до 1000 В:
  - 10 Ом при сумарній потужності генераторів або трансформаторів, що живлять дану мережу, не більше 100 кВА;
  - 4 Ом у всіх інших випадках;
- для установок вище 1000 В:
  - 0,5 Ом при заземленій нейтралі (тобто при великих струмах замикання на землю);
  - 10 Ом у всіх інших випадках.

При використанні заземлюючого пристрою одночасно для електроустановок напругою до 1 кВ повинні виконуватися вимоги, що ставляться до заземлення електроустановок до 1 кВ.

В електроустановках вище 1кВ, а також в електроустановках до 1 кВ з ізольованою нейтраллю для землі з питомим опором більше 500 Ом·м допускається підвищити необхідні значення опорів заземлюючих пристроїв у 0.002  $\rho$  разів, де  $\rho$  – еквівалентний питомий опір землі. При цьому збільшення опорів заземлюючих пристроїв повинно бути не більше десятиразового.

При живленні електроприймачів пересувних установок від пересувних автономних джерел з ізольованою нейтраллю заземлюючий пристрій повинен виконуватись з додержанням вимог або до його опору, або до напруги дотикання при однополюсному замиканні на корпус. Значення його опору не повинно перевищувати 25 Ом.

### Контрольні питання

1. За допомогою чого здійснюється грозозахист будинків і споруд?
2. Назвіть основні функціональні елементи кожного блискавковідводу.
3. Що таке висота орієнтування блискавки? Чому вона дорівнює?
4. Дайте визначення зони захисту блискавковідводу.
5. Назвіть категорії, на які поділяються будинки і споруди в залежності від ступеня гронезбезпеки.
6. Як здійснюється захист від ПУБ будинків і споруд I-ї (II-ї, III-ї) категорії?
7. Чому треба додержуватись певної відстані між блискавковідводом та об'єктом, що захищається?

8. Як розраховується відстань між блискавковідводом та об'єктом, що захищається?
9. Від яких факторів залежать розміри захисної зони блискавковідводів?
10. Як визначається зона захисту поодинокого стержневого блискавковідводу?
11. Як визначається спільна зона захисту двох блискавковідводів однакової висоти?
12. Як визначається спільна зона захисту двох блискавковідводів різної висоти?
13. Як визначається зона захисту поодинокого троса?
14. Як визначається зона захисту двох паралельних тросів?
15. Яким параметром характеризують захисну дію тросів?
16. Які елементи використовуються як несучі пристрої для кріплення струмовідних частин блискавковідводів?
17. Назвіть переріз струмовідних частин блискавковідводів.
18. Який фізичний сенс імпульсного коефіцієнта заземлювача?
19. Дайте визначення робочому і захисному заземленню.
20. З яких елементів складається будь-яке заземлення?
21. Дайте визначення заземлювача.
22. Дайте визначення заземлюючих провідників.
23. Дайте визначення опору заземлюючого пристрою. Від чого залежить опір заземлювача?
24. Як визначається опір розтікання для вертикальної труби у поверхні землі?
25. Як визначається опір розтікання для вертикальної труби, заглибленої в землю?
26. Як визначається опір розтікання для горизонтального штабового електрода в землі?
27. Чому, як правило, використовують складні (групові) заземлювачі?
28. Назвіть основні геометричні розміри вертикальних і горизонтальних електродів в складі групового заземлювача.
29. Як враховується зміна опору групового заземлювача через взаємний вплив електричних полів сусідніх електродів?
30. Як визначається опір групового заземлювача?
31. Як визначається опір заземлення рейки?
32. Назвіть потрібні опори заземлюючих пристроїв.

## Розділ 9

### ЗАХИСТ ВІД ХВИЛЬ ПЕРЕНАПРУГ, ЩО НАБІГАЮТЬ З ЛІНІЙ

#### 9.1. Призначення і класифікація розрядників

Грозозахисними розрядниками називаються пристрої, призначені для захисту ізоляції ліній електропередачі та обладнання електричних станцій і підстанцій від хвиль атмосферних перенапруг.

Принцип захисту ізоляції за допомогою розрядників полягає в наступному. Будь-який розрядник має в своєму складі повітряний іскровий проміжок. Довжина проміжку вибирається такою, щоб не відбувалось його електричного пробоя під дією робочої напруги електроустановки і при комутаційних перенапругах (у більшості електричних пристроїв рівень ізоляції вище максимально можливої величини комутаційних перенапруг). Розрядник підмикається паралельно захищуваній ізоляції (рис. 9.1). При набіганні хвилі атмосферної перенапруги розрядник спрацьовує, тобто відбувається пробій повітряного проміжку, і струм блискавки відводиться в землю. Для надійного захисту ізоляції необхідно, очевидно, щоб розрядник спрацьовав перш, ніж напруга на ізоляції досягне небезпечної величини. Більш точно цю умову можна сформулювати так: для надійного захисту ізоляції необхідно, щоб вольт-секундна характеристика розрядника усіма точками лежала нижче вольт-секундної характеристики захищуваної ізоляції.

Услід за струмом блискавки по утвореному шляху починає протікати струм під дією робочої напруги електроустановки, що приводить до утворення в проміжку електричної дуги. Цей струм називається супровідним і є, по суті, струмом короткого замикання. Щоб не відбувалось відмикання електроустановки релейним захистом, розрядник повинен перервати супровідний струм.

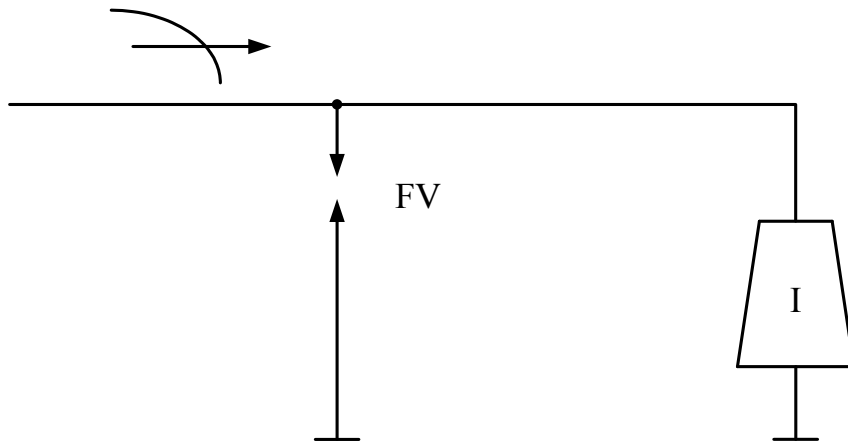


Рис. 9.1. Схема підмикання грозозахисних розрядників:  
FV – розрядник; I – ізоляція, що захищається

На підставі викладеного можна сформулювати три основні вимоги, що ставляться до розрядників будь-якого типу:

- розрядник повинен спрацьовувати при напругах, безпечних для захищеної ізоляції;
- розрядник повинен надійно і швидко гасити дугу супровідного струму;
- розрядник не повинен спрацьовувати при комутаційних перенапругах (за виключенням випадків, коли розрядник спеціально призначений для обмеження комутаційних перенапруг).

Виконання першої вимоги досягається шляхом узгодження вольт-секундних характеристик розрядника і захищеної ізоляції; другої – різними конструктивними заходами (про них буде сказано нижче), третьої – відповідним вибором довжини іскрового проміжку.

Застосовуються грозозахисні розрядники трьох типів:

- захисні іскрові проміжки ПЗ;
- трубчаті розрядники РТ;
- вентильні розрядники РВ.

Захисні іскрові проміжки – найпростіший тип розрядника. Виконуються вони у вигляді двох електродів (стержнів або „рогів”), один з яких з’єднується з проводом (шиною), а другий – із землею. Рогоподібна форма електродів сприяє розтягуванню дуги, що полегшує її гасіння. Допускається використання проводу як одного з електродів.

Параметри іскрових проміжків подані в табл. 9.1 (за даними роботи [22]).

Таблиця 9.1

Параметри іскрових проміжків

Параметр	Номінальна напруга, кВ			
	3	6	10	35
Довжина основного проміжку, мм	20	40	60	250
Довжина додаткового проміжку, мм	5	10	15	30
Розрядна напруга при 50 Гц, діюче значення, кВ	20	34	45	105
Імпульсна розрядна напруга, кВ (для від'ємного імпульсу)	34	53	68	220

Захисні проміжки не відповідають другій вимозі, тобто вони не можуть самостійно погасити дугу супровідного струму. Тому їх застосування можливе тільки в системах, обладнаних пристроями АПВ. Іноді ПЗ використовують в мережах, нейтраль яких заземлена через дугогасильну котушку.

Другим серйозним недоліком ПЗ є те, що вони мають круту вольт-секундну характеристику, яку неможливо узгодити з пологою, як правило, вольт-секундною характеристикою ізоляції станційного обладнання (рис. 9.2). Тому застосовують ПЗ лише для захисту ізоляції ліній електропередачі та контактної мережі.

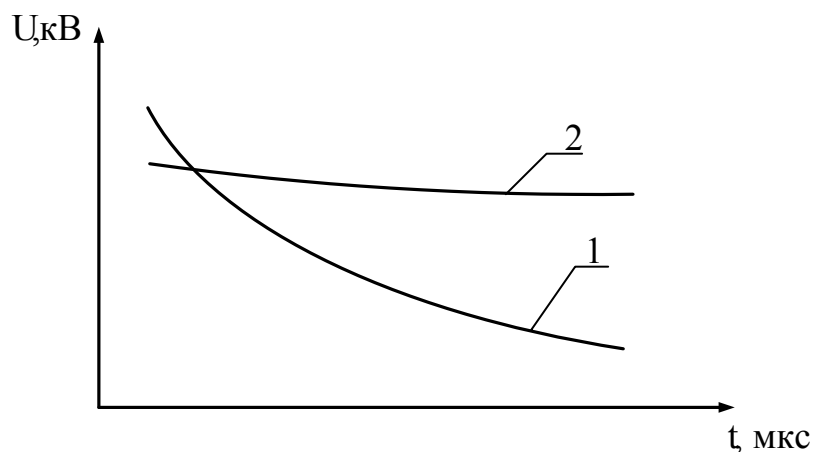


Рис. 9.2. Вольт-секундні характеристики захисних іскрових проміжків (1) та ізоляції станційного обладнання (2)

## 9.2. Трубчаті розрядники

Трубчаті розрядники РТ були розроблені і стали застосовуватись ще в довоєнні роки. Використовувались вони тоді для захисту ізоляції ліній електропередачі і ставились на всьому протязі ЛЕП. З появою тросового захисту і вентиляльних розрядників роль РТ дещо знизилась, однак і в наш час вони широко використовуються в схемах захисту станцій та підстанцій, для захисту місць ЛЕП з послабленою ізоляцією (такими місцями є транспозиційні опори, окремі металеві опори ліній на дерев'яних опорах, перетини ліній електропередачі різних класів напруг, перетини ЛЕП з повітряними лініями зв'язку тощо), для захисту контактної мережі змінного струму.

Конструкція РТ проста і містить у собі такі основні елементи (рис. 9.3): газогенеруючу трубку 1, стержневий електрод 2, кільцевий електрод 3.

Повітряний проміжок  $S_1$  між електродами 2 і 3 називається внутрішнім іскровим проміжком, а  $S_2$  – зовнішнім іскровим проміжком.

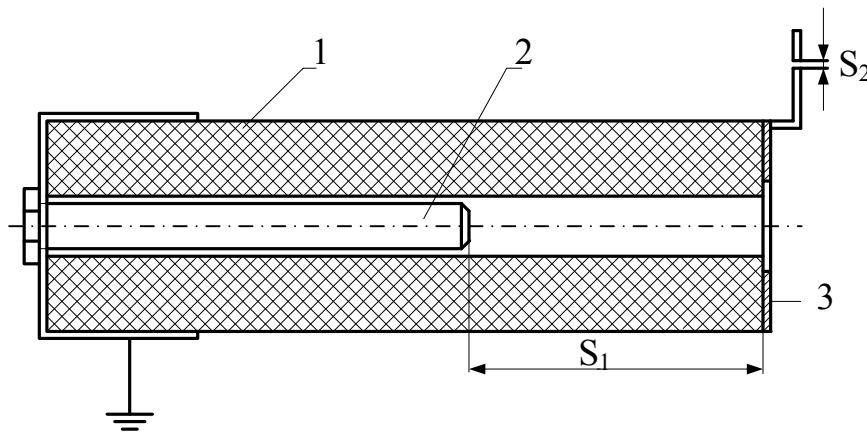


Рис. 9.3. Схема будови та ввімкнення трубчатого розрядника: 1 – газогенеруюча трубка; 2 – стержневий електрод; 3 – кільцевий електрод;  $S_1$  – внутрішній іскровий проміжок;  $S_2$  – зовнішній іскровий проміжок

Матеріал трубки 1 повинен мати велику механічну міцність, бути негігроскопічним і виділяти при температурі електричної дуги велику кількість газів. Спочатку таким матеріалом була

фібра. Для надання необхідної механічної міцності фіброва трубка покривалась зверху папером, просоченим бакелітовим лаком. Виготовлені на основі фібри розрядники отримали назву фібробакелітових (РТФ).

Пізніше трубки стали виготовляти з вініпласту, який за всіма основними показниками перевищує фібру; з'явилися розрядники трубчаті вініпластові (РТВ). Однак і фібра, і вініпласт не витримують тривалого діяння високої напруги: під дією струмів витоку вони розкладаються. Тому підмикання трубчатих розрядників до проводів ЛЕП проводиться через зовнішній іскровий проміжок  $S_2$  (рис. 9.4).

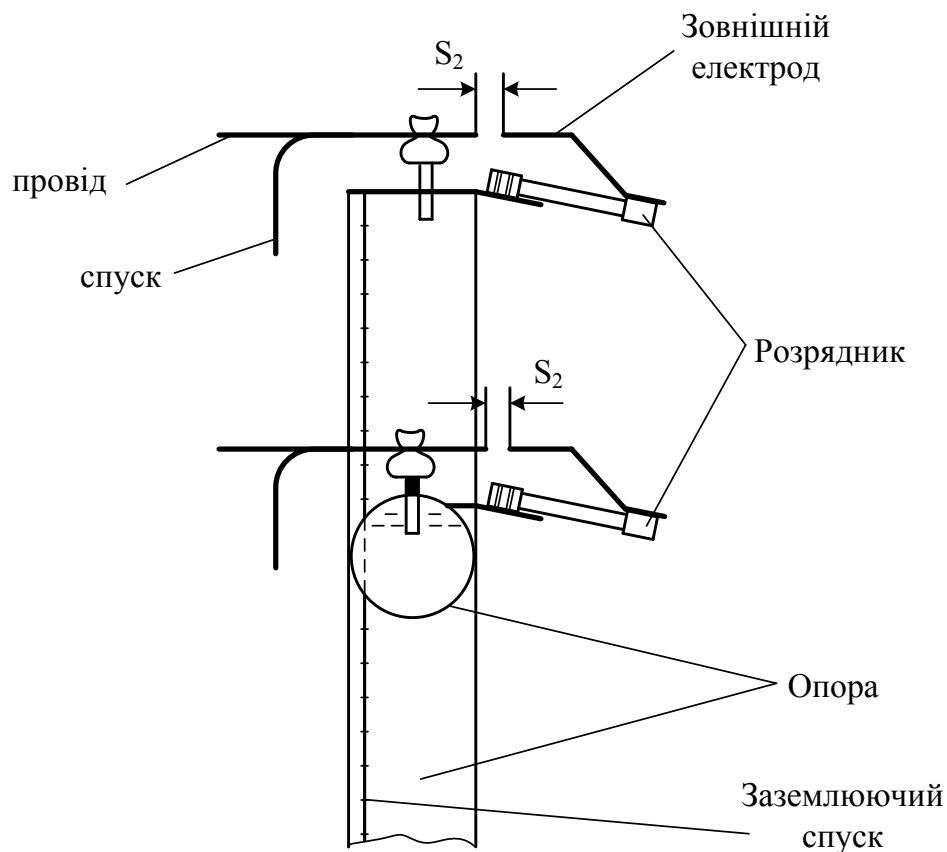


Рис. 9.4. Встановлення трубчатих розрядників на кінцевій дерев'яній опорі

Свої захисні функції трубчаті розрядники виконують таким чином. При набіганні хвилі перенапруги відбувається пробій проміжків  $S_1$  та  $S_2$  і, як наслідок, відвід струму блискавки в

землю. Далі по розряднику починає протікати супровідний струм, у повітряних проміжках виникає електрична дуга, під дією якої всередині трубки виділяється велика кількість газів. Тиск в трубці швидко зростає, при першому переході супровідного струму через нульове значення (коли в зоні горіння дуги тиск слабшає, а в решті об'єму трубки він високий) дуга видувається, „вистрілюється” назовні через отвір в кільцевому електроді. Гази, які ще деякий час виділяються, сприяють відновленню електричної міцності проміжку  $S_1$ , і повторного запалювання дуги не відбувається.

Напруга спрацьовування трубчатих розрядників визначається сумарною величиною проміжків  $S_1$  і  $S_2$ . Внутрішній іскровий проміжок установлюється на заводі, його величина вибирається з умови надійного гасіння дуги; у процесі експлуатації  $S_1$  не регулюється. Проміжок  $S_2$  регульований, він повинен доповнювати  $S_1$  таким чином, щоб вольт-секундна характеристика РТ забезпечувала надійний захист ізоляції.

Вибір трубчатих розрядників проводиться за двома параметрами: за напругою ЛЕП і за нижньою і верхньою границями супровідних струмів, які відмикаються. Верхня границя цих струмів визначається допустимою величиною тиску в трубці: якщо супровідний струм перевищить верхню границю, то тиск газів може зруйнувати розрядник. Нижня границя цих струмів вибирається з умови надійного гасіння дуги. При надто малих струмах інтенсивність газогенерації може виявитись недостатньою для видування дуги. Обидві границі зміщуються в бік більших значень при зменшенні довжини внутрішнього проміжку і збільшенні діаметра каналу трубки. Ця залежність дозволяє виробляти РТ з різними границями струмів, що відмикаються, при одній і тій же напрузі мережі.

Для полегшення вибору трубчаті розрядники споряджаються табличками, на яких зазначено їх маркування. Наприклад РТ 35/(1.8-10) означає, що розрядник призначений для установлення в мережі 35 кВ і може відмикати супровідні струми від 1,8 до 10 кА.

Вище зазначалось, що газогенеруюча трубка може виготовлятися з фібри або вініпласту. Фібра має гіршу газогенеруючу здатність, ніж вініпласт. Тому розрядники РТФ



(рис. 9.5) мають біля закритого кінця спеціальну накопичувальну камеру, яка сприяє надійному гасінню дуги. Вініпластові розрядники (рис. 9.6) працюють успішно і без такої камери.

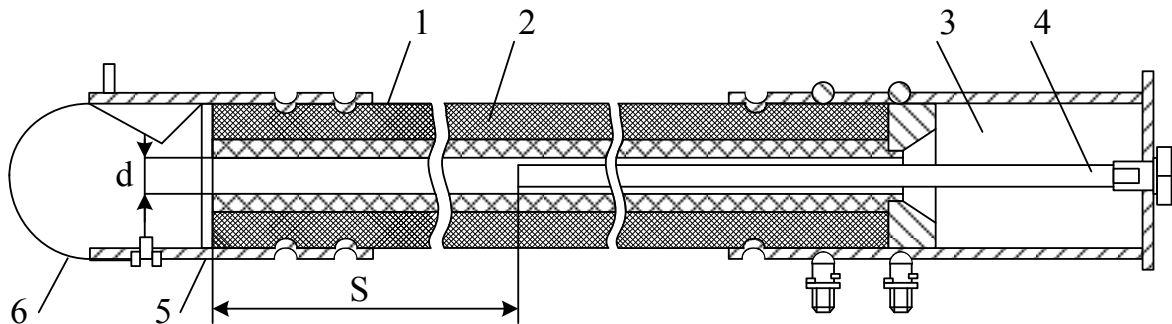


Рис. 9.5. Фібробакелітовий трубчатий розрядник:  
 1 – папір, просочений бакелітовим лаком; 2 – фібра;  
 3 – газозбірна камера; 4 – стержневий електрод;  
 5 – кільцевий електрод; 6 – показчик спрацьовування

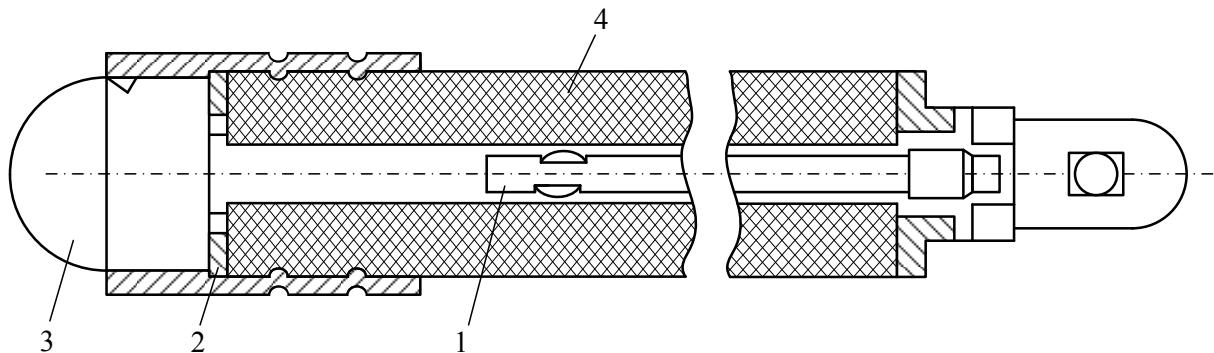


Рис. 9.6. Вініпластовий трубчатий розрядник:  
 1 – стержневий електрод; 2 – кільцевий електрод;  
 3 – показчик спрацьовування; 4 – вініпластова трубка

Загальним недоліком РТФ і РТВ є те, що вони здатні відмикати супровідні струми, які не перевищують 10 кА: при великих струмах трубки руйнуються. Порівняно недавно розроблені розрядники серії РТВУ – вініпластові посилені з

верхньою границею вимикних струмів до 20 кА. Збільшення верхньої границі досягнуто за рахунок нанесення на вініпластову трубку зміцнювального покриття із склотканини та епоксидної смоли.

Трубчаті розрядники можуть постачатись реєстраторами спрацьовування. Найпростіший реєстратор являє собою гнучку металеву пластину, один кінець якої жорстко кріпиться до корпусу розрядника, а другий вставляється у вихлопний отвір РТ.

При спрацьовуванні РТ вільний кінець пластини відкидається. Таким чином, за положенням реєстратора можна судити про те, спрацював даний розрядник чи ні.

Монтаж РТ повинен проводитися з урахуванням таких обставин:

1) попадання вологи всередину розрядника не припустимо. Тому кріпити РТ треба під кутом до горизонту відкритим кінцем донизу;

2) спрацьовування РТ супроводжується утворенням біля відкритого кінця зони іонізованих газів. Розміри цієї зони можуть досягати 2-3 м у довжину і 1,5-2 м у поперечину. Тому розташування РТ на опорі повинно бути таким, щоб вихлопні гази не викликали перекриття між фазами або на землю.

На закінчення зазначимо основні переваги й недоліки трубчатих розрядників. До переваг РТ належать простота конструкції і порівняно невисока вартість.

Недоліками РТ є:

- обмеженість ресурсу роботи; після 7-8 спрацьовувань трубка вигоряє настільки, що розрядник втрачає механічну міцність і підлягає заміні;
- велика крутість вольт-секундної характеристики; ця обставина не дозволяє використовувати РТ для захисту ізоляції обладнання станцій і підстанцій;
- обмеженість границь відмикних струмів і зміна цих границь в міру вигоряння трубки.

Основні електричні характеристики трубчатих розрядників наведені в табл. 9.2.

Таблиця 9.2

## Трубочаті розрядники

Тип розрядника	Номінальна напруга, кВ	Границі струмів, що відмикаються, кА		Довжина іскрових проміжків, мм		Розрядна напруга, кВ, при 50 Гц		Імпульсна розрядна напруга, кВ, при хвили		Розміри, мм		Діаметр внутрішніх трубок, мм	Маса, кг
		нижня	верхня	зовнішнього	внутрішнього	суха	під дощем	1,5/40 мкс*	при 2 мкс	А	Б		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
<b>Фіробакелітові</b>													
$PT - \frac{6}{1,5-10}$	6	1,5	10	15	80	29	24	68	83	475	44,5	10	1,8
$PT - \frac{10}{0,5-7}$	10	0,5	7	20	130	45	35	80	83	475	44,5	10	1,8
$PT - \frac{35}{0,4-3}$	35	0,4	3	80	175	95	75	160	200	663	35	8	1,4
				100	175	105	83	180	220				
				150	175	130	110	225	265				
				200	175	155	135	270	310				
$PT - \frac{35}{0,8-5}$	35	0,8	5	80	175	10	65	180	210	785	44,5	10	2,5
				100	175	105	73	195	230				
				150	175	115	90	235	275				
				200	175	125	105	270	330				
$PT - \frac{35}{1,8-10}$	35	0,8	10	80	140	90	80	155	180	730	60	12	4,2
				100	140	96	82	170	195				
				150	140	115	96	210	240				
				200	140	130	105	245	290				
<b>Вініпластові</b>													
$PTB - \frac{6-10}{0,5-4}$	6	0,5	4	10	60	33	32	60	65	619	50	6	3,4
	10	0,5	4	15	60	42	40	65	68	619	50	6	3,4
$PTB - \frac{6-10}{2-12}$	6	2	12	10	60	33	32	60	65	619	50	11	3,5
	10	2	12	15	60	42	40	65	68	619	50	11	3,5

\*Мінімальна розрядна напруга.

Продовження табл. 9.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
РТВ – $\frac{15}{2-12}$	15	2	12	25	80	55	45	90	98	659	50	11	3,6
РТВ – $\frac{20}{2-12}$	20	2	12	40	100	65	55	115	125	705	50	11	3,7
РТВ – $\frac{35}{2-10}$	35	2	10	89 100 150 200	140 140 140 140	100 115 150 180	100 110 145 170	135 165 210 260	145 180 225 288	709	50	11	3,7
РТВ – $\frac{110}{2-10}$	110	2	10	350 400 500	300 300 300	310 335 395	275 300 350	380 400 460	435 480 575	829	50	14	4,0
Вініпластові підсилені													
РТВУ – $\frac{35}{2-10}$	35	2	20	100 150 200	140 140 140	100 147 195	85 120 156	165 225 265	180 262 308	- - -	- - -	- - -	- - -
	35	7	30	100 150 200	140 140 140	100 147 195	85 120 156	165 225 265	180 262 308	- - -	- - -	- - -	- - -
РТВУ – $\frac{110}{5-20}$	110	5	20	400 450 500	300 300 300	217 265 282	212 234 255	405 460 490	480 505 538	- - -	- - -	- - -	- - -
РТВУ – $\frac{110}{7-30}$	110	7	30	400 450 500	300 300 300	217 265 282	212 234 255	405 460 490	480 505 538	- - -	- - -	- - -	- - -

### 9.3. Вентильні розрядники

Вентильні розрядники (РВ) призначені для захисту від атмосферних перенапруг ізоляції високовольного обладнання електричних станцій і підстанцій. Від трубчатих розрядників вони відрізняються тим, що мають пологу вольт-секундну характеристику і в них інакше, ніж у трубчатих розрядників, гаситься дуга супровідного струму.

Існує декілька типів РВ, однак всякий вентильний розрядник обов'язково містить два основні елементи: багаторазовий іскровий проміжок і нелінійний робочий опір.

Багаторазовий іскровий проміжок (ІІІ) складається з одиничних проміжків, які повинні відповідати двом основним вимогам:

- мати якомога більш полого вольт-секундну характеристику;
- у процесі експлуатації зберігати по можливості незмінною величину пробивної напруги.

У перших типах вентильних розрядників використовувались іскрові проміжки з нерухомою дугою. Конструкція такого проміжку показана на рис. 9.7. Проміжок утворюється двома латунними електродами спеціальної форми, розділеними ізолюючою прокладкою з міканіту. Електричне поле між електродами однорідне, що сприяє отриманню пологої вольт-секундної характеристики проміжку.

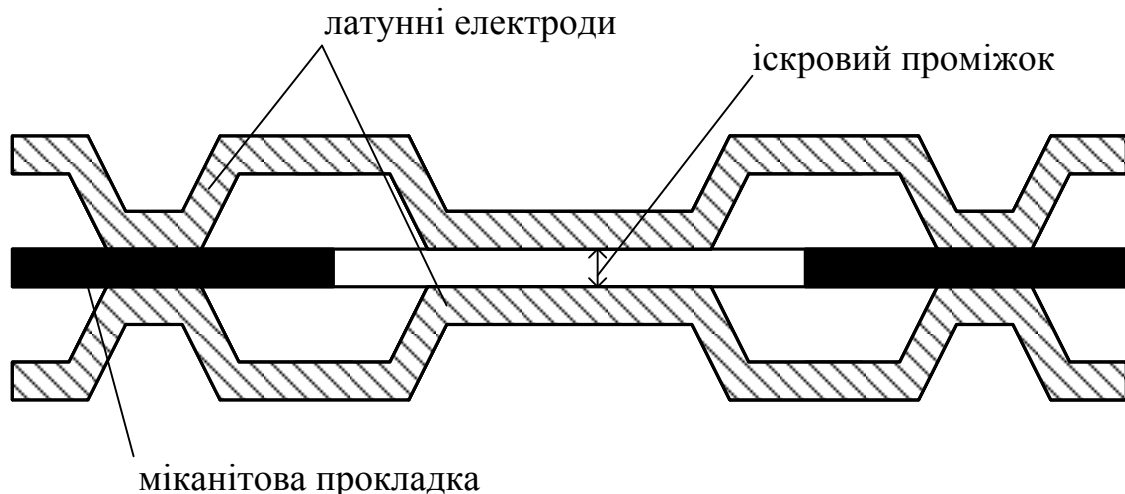


Рис. 9.7. Конструкція одиничного іскрового проміжку з нерухомою дугою

Проміжки з нерухомою дугою прості за конструкцією, стабільні в експлуатації, але мають суттєвий недолік: вони не можуть погасити дугу супровідного струму, якщо величина його перевищує 80-100 А.

Більш удосконаленими є іскрові проміжки, в яких дуга супровідного струму рухома.

Розглянемо два типи таких проміжків:

- ІІ з розтягуючою дугою;
- ІІІ з обертовою дугою.

Загальним для цих двох типів проміжків є те, що дуга переміщається під дією сили, що виникає в результаті взаємодії струму дуги з магнітним полем, в якому розташовується проміжок. Магнітне поле утворюється або постійним магнітом, або котушками, через які пропускається супровідний струм. Узгоджене вмикання котушок забезпечує незалежність напрямку сили, що діє на дугу, від полярності струму.

Принцип дії проміжку з розтягуючою дугою пояснюється рис. 9.8. Дуга 1 супровідного струму  $I_{\text{супр}}$ , що виникла між електродами, під дією сили  $F$  переміщається вправо і розтягується. Наявність перегородок 3 сприяє збільшенню довжини дуги. Дугогасильна камера 2 виконана таким чином, що зсув дуги відбувається в область вузької щілини.

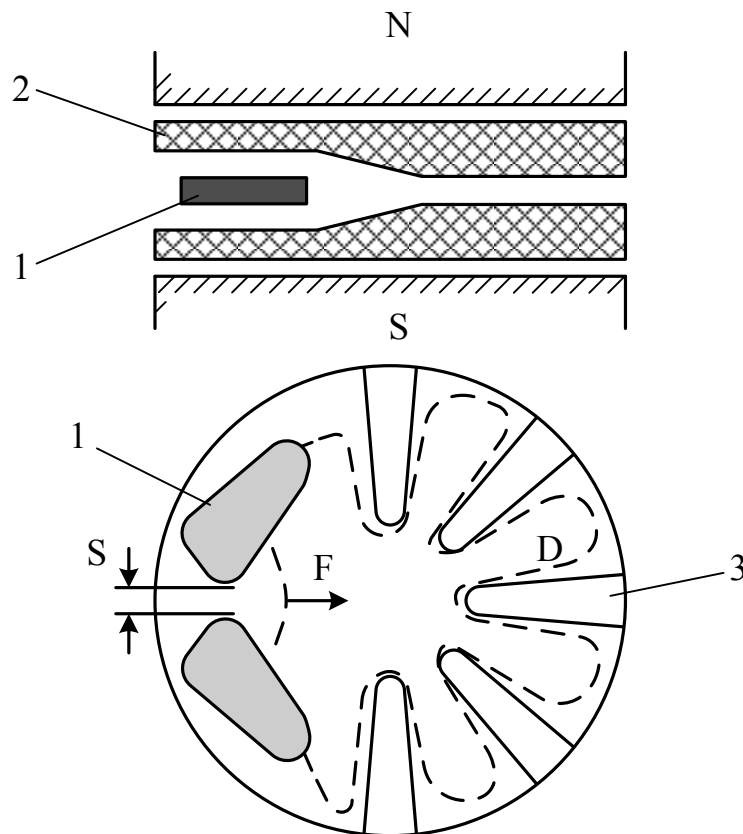


Рис. 9.8. Одиничний іскровий проміжок з дугою, що розтягується

При горінні дуги в обмеженому просторі градієнт напруги на дузі, як відомо, вище у порівнянні з градієнтом напруги на дузі, яка вільно горить. Завдяки зазначеним обставинам спад

напруги на розтягнутій дузі складає декілька сот вольт, що приводить до обмеження величини  $I_{\text{супр}}$  і полегшення гасіння дуги. Одиничний іскровий проміжок з обертовою дугою зображений на рис. 9.9. Працює він так: супровідний струм, взаємодіючи з магнітним полем, приводить дугу до обертання зі швидкістю, яка досягає 70-80 обертів за півперіод частоти 50 Гц. При цьому дуга інтенсивно охолоджується і надійно гаситься при першому переході супровідного струму через нуль.

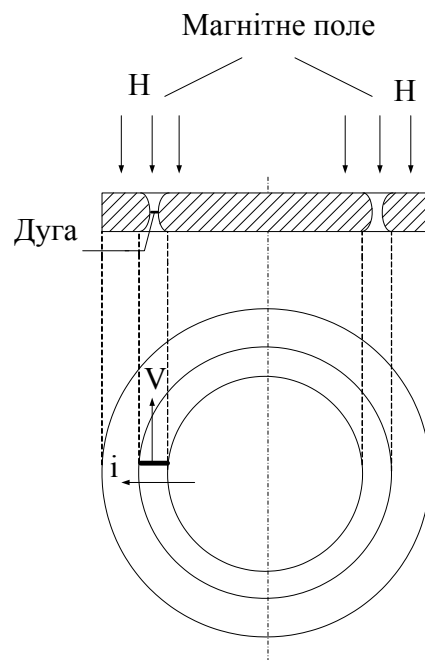


Рис. 9.9. Схема іскрового проміжку з обертовою дугою

Робочий опір  $R_B$  служить для обмеження величини супровідного струму до значень, при яких дуга надійно гаситься в П. Для всіх типів вентильних розрядників, в яких використовують П з нерухомою дугою, величина  $I_{\text{супр}}$  не повинна перевищувати 80-100 А. Застосування проміжків з розтягуючою чи обертовою дугою дозволило збільшити граничне значення  $I_{\text{супр}}$  до 1500 А. Про те, які це дає переваги, буде сказано нижче.

Супровідний струм тече в розряднику по шляху струму блискавки, тобто робочий опір виявляється увімкненим в це коло.

Спад напруги на робочому опорі при протіканні по ньому струму блискавки називається залишковою напругою  $U_{\text{зал}}$ . При

великих струмах величина  $U_{\text{зал}}$  може перевищувати напругу, при якій розрядник спрацьовує. Тому рівень ізоляції пристроїв, захищуваних РВ, визначається не тільки величиною пробивної напруги розрядника, але й залишковою напругою. Звідси витікає, що для зниження рівня ізоляції обладнання станцій і підстанцій необхідно зменшити  $U_{\text{зал}}$ , тобто зменшити величину робочого опору РВ. З іншого боку, для надійного гасіння дуги величина робочого опору повинна бути якомога більшою. Зазначене протиріччя вдало вирішено в РВ шляхом використання робочого опору матеріалу з нелінійною вольт-амперною характеристикою – віліту.

Основу віліту складають зерна електротехнічного карборунду ( $\text{SiC}$ ). У суміші з рідким склом карборунд формується і обпалюється при температурі близько  $500^\circ\text{C}$ . Технологія виробництва віліту забезпечує отримання на поверхні зерен напівпровідникового запірного шару двоокису кремнію ( $\text{SiO}_2$ ), який змінює свою провідність при зміні прикладеної напруги. Причому залежність ця така, що чим вище напруга, тим більше провідність запірного шару і тим, отже, менше опір віліту. Завдяки зазначеній властивості віліт чинить відносно малий опір великим імпульсним струмам і великий опір супровідному струму.

Властивість матеріалу змінювати свій опір в залежності від напруги називають «вентильною». Звідси і назва апарата: вентильний розрядник.

Вольт-амперна характеристика віліту, яка подана на рис. 9.10, описується рівнянням вигляду

$$U_{\text{зал}} = CI^\alpha, \quad (9.1)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт нелінійності (вентильності) віліту; дослідним шляхом встановлено, що при малих струмах (ліва гілка характеристики)  $\alpha=0.28-0.32$ ; при великих струмах  $\alpha=0.13-0.2$ ;

$C$  – коефіцієнт; який має розмірність опору і чисельно дорівнює спаду напруги на робочому опорі при струмі в 1 А; величина  $C$  визначається геометричними розмірами цього елемента.



Віліт може вбирати вологу і при цьому втрачати свої властивості. Тому вентиляльні розрядники роблять герметичними. Іншим недоліком віліту є обмежена пропускна струмова здатність, обумовлена його нетеплостійкістю. Ця обставина привела до необхідності нормувати (обмежувати) максимальне значення імпульсного струму, що протікає через РВ. У наш час випускають розрядники, розраховані на найбільші струми в 5 і 10 кА.

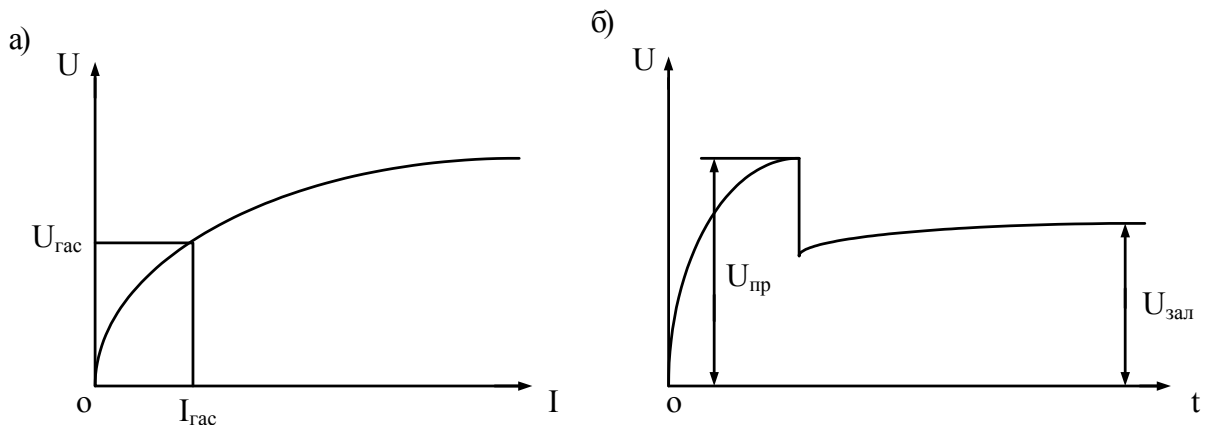


Рис. 9.10. Вольт-амперна характеристика віліту (а) і напруга на вентиляльному розряднику при його спрацьовуванні (б)

Робочий опір РВ складається із стандартних вілітових дисків, число яких вибирають з умови обмеження величини супровідного струму до значень, при яких дуга надійно гаситься.

Раніше відзначалось, що іскровий проміжок вентиляльних розрядників є багаторазовим, тобто складається з кількох одиничних ІП. Застосування багаторазових ІП дає такі переваги:

- в багаторазовому ІП дуга супровідного струму розбивається на низку коротких дуг, що покращує умови гасіння (в коротких проміжках дугу гасити легше);
- при багаторазовому ІП є можливість регулювати розподіл напруги по проміжках і таким чином впливати на величину пробивної напруги.

Розглянемо останнє положення більш детально. Для цього скористуємося схемою заміщення вентиляльного розрядника, показаною на рис. 9.11. На рисунку позначено:  $C$  – ємність одиничних іскрових проміжків;  $C_{\text{п}}$  – ємність одиничних ІП по

відношенню до землі (паразитні ємності);  $R_{ш}$  – шунтуючі опори;  $R_B$  – робочий нелінійний опір. Строго кажучи, електроди іскрових проміжків мають ємність і по відношенню до провода, але величина цієї ємності у порівнянні з  $C_{п}$  дуже мала і не чинить суттєвого впливу на роботу розрядника.

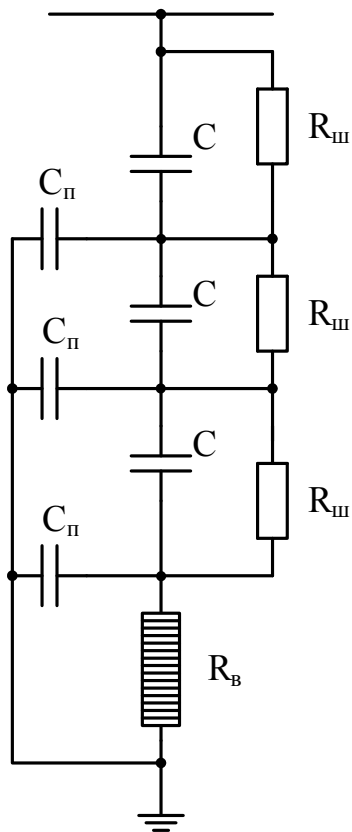


Рис. 9.11. Схема заміщення вентильного розрядника

Наявність паразитних ємностей  $C_{п}$  приводить до того, що при діянні на розрядник імпульсної перенапруги розподіл напруги на одиничних ПІ буде нерівномірним: найбільша напруга стане прикладеною до верхнього проміжку, а найменша – до нижнього (за рахунок відгалуження частини струму від кожного наступного ПІ через  $C_{п}$  на землю). Шунтуючі резистори в цей момент не чинять впливу на розподіл напруги, тому що їх опір великий у порівнянні з опором паразитних ємностей (необхідно мати на увазі, що імпульсна перенапруга еквівалентна сигналу високої частоти  $\sim 10^5$  Гц, а на великих частотах ємності мають малий опір).

Таким чином, при набіганні на розрядник хвилі імпульсної (грозової) перенапруги розподіл напруги по іскрових проміжках буде неоднаковим, що сприяє зниженню напруги спрацьовування розрядника. Змінюючи величину  $C_{п}$ , можна регулювати розподіл напруги на проміжках і внаслідок цього змінювати напругу спрацьовування РВ.

Після пробою проміжків і відведення струму блискавки в землю через розрядник протікає струм частотою 50 Гц. При цьому опір паразитних ємностей стане набагато більше, ніж  $R_{ш}$ . Тому частина струму буде протікати по шунтуючих резисторах, а оскільки величина їх підбирається однаковою, то і спад напруги

на всіх  $R_{ш}$  також буде однаковим. Після гасіння дуги супровідного струму всі одиничні  $\Pi$  опиняються під однаковою напругою, що сприяє більш швидкому і надійному відновленню електричної міцності проміжку.

Таким чином, шунтуючі резистори підвищують надійність гасіння дуги. Вплив  $R_{ш}$  виявляється ще і в тому, що при виникненні комутаційних перенапруг вони вирівнюють розподіл напруги по  $\Pi$  і ускладнюють спрацьовування розрядників. У нормальних умовах, тобто при відсутності перенапруг, через  $R_{ш}$  і робочий опір протікає невеликий струм (порядку 400-600 мкА), який називається струмом провідності.

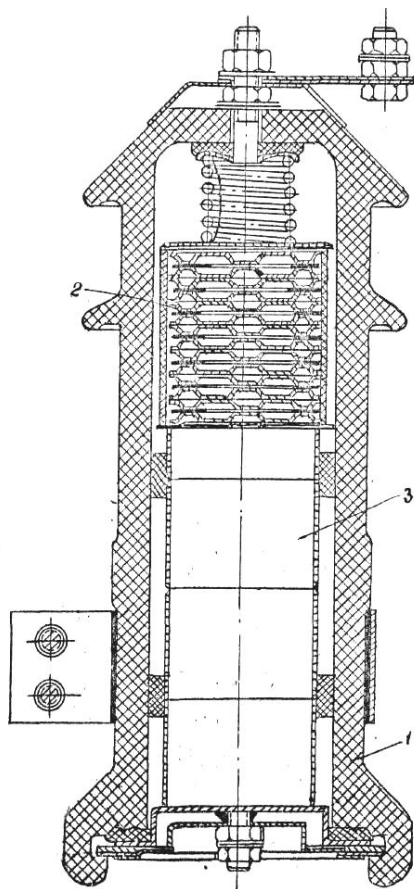


Рис. 9.12. Конструкція розрядника типу РВП:  
1 – корпус; 2 – блок одиничних іскрових проміжків;  
3 – вільтові диски

Випускаються вентильні розрядники нижченаведених типів.

1. РВП – розрядники вентильні підстанційні. РВП призначені для захисту від атмосферних перенапруг розподільних устаткувань невеликої потужності. Конструкція розрядників серії РВП показана на рис. 9.12. Особливістю розрядників РВП є відсутність у них шунтуючих опорів, що обумовлено в основному економічними міркуваннями.

Модифікацією розрядників серії РВП є розрядники РВО – розрядники вентильні полегшені. Від РВП вони відрізняються конструкцією одиничних іскрових проміжків і поліпшеними ваго-габаритними показниками. До розрядників РВП слід віднести і розрядник РС-10 з підвищеною дугогасильною здатністю, досягнутою за рахунок збільшення числа одиничних  $\Pi$ .

2. РВС – розрядники вентильні стандартні. РВС застосовуються для захисту обладнання електричних станцій середньої і великої потужності. Конструктивне виконання розрядників РВС показано

на рис. 9.13. На відміну від РВП іскровий проміжок РВС комплектується зі стандартних блоків, які складаються з чотирьох

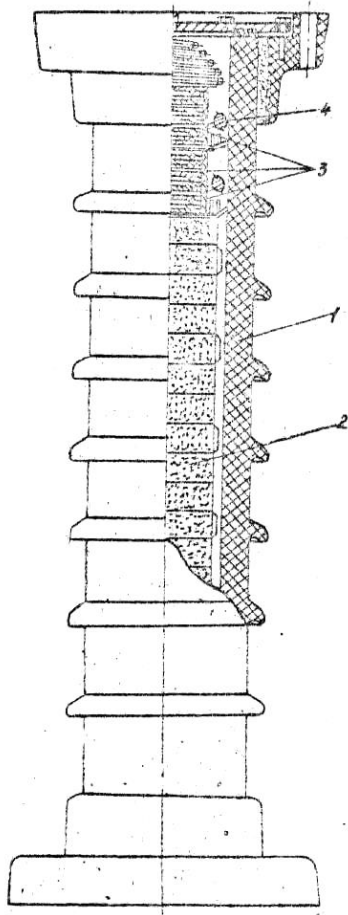


Рис. 9.13. Конструкція розрядника типу РВС:

- 1 – корпус; 2 – вілітові диски;  
3 – блоки одиничних проміжків;  
4 – шунтуючий опір

одиничних П, розміщених у фарфоровому корпусі. Кожний блок П шунтується високоомним карборундовим опором  $R_{ш}$ . Відзначимо ще раз, що наявність шунтуючих опорів відбивається на роботі розрядника при напрузі частоти 50 Гц, коли величина  $R_{ш}$  стає менше ємнісного опору П відносно землі. Струм, який протікає по  $R_{ш}$ , сприяє вирівнюванню розподілу напруги по іскрових проміжках, що утруднює спрацьовування розрядника при комутаційних перенапругах і полегшує відновлення електричної міцності П у момент гасіння дуги супровідного струму.

3. РВВМ – розрядники вентиляльні для захисту обертових машин. Рівень ізоляції у обертових машин нижче, ніж у іншого обладнання, тому РВВМ мають поліпшені, у порівнянні з РВП і РВС, захисні характеристики, а саме: меншу напругу спрацьовування і меншу величину залишкової напруги. Для зменшення напруги пробою П частина проміжків у РВВМ шунтується ємністю, що приводить до нерівномірного розподілу напруги на П і прискорює його пробій. Зменшення величини  $U_{зал}$  досягають підбором вілітових дисків з мінімальним значенням коефіцієнта нелінійності  $\alpha$ . У підсумку конструкція розрядників РВВМ схожа з конструкцією РВС.

Розрядники вентиляльні серій РВП, РВО, РВС і РВВМ мають одиничні іскрові проміжки з нерухомою дугою.

4. РВМГ – розрядники вентильні з магнітним гасінням дуги, грозові. У цих розрядниках використовуються ПП з обертовою дугою. Розрядники серії РВМГ застосовуються для захисту від грозових перенапруг обладнання підстанції середньої та великої потужності.

5. РВМК – розрядники вентильні з магнітним гасінням дуги, комбіновані. РВМК використовуються в електричних системах надвисоких напруг і призначені для захисту як від грозових, так і від комутаційних перенапруг. Робочий опір РВМК виготовляється з тервіту, який має більшу, ніж вліт, пропускну здатність, але гіршу нелінійність ( $\alpha=0.3$ ). Електрична схема РВМК наведена на рис. 9.14. З рисунку видно, що робочий опір розділено на дві частини, одна з яких вмикається паралельно додатковому іскровому проміжку  $S_2$ . Величина його вибирається такою, що пробій проміжку відбувається при протіканні по розряднику великих струмів блискавки. У цьому разі спад напруги на  $R_2$  перевищує напругу пробією ПП2, цей проміжок пробивається і шунтується опір  $R_2$ . Таким чином, залишкова напруга на розряднику буде визначатись тільки опором  $R_1$ . При комутаційних перенапругах пробією ПП2 не відбувається, і величина струму обмежується повним опором розрядника.

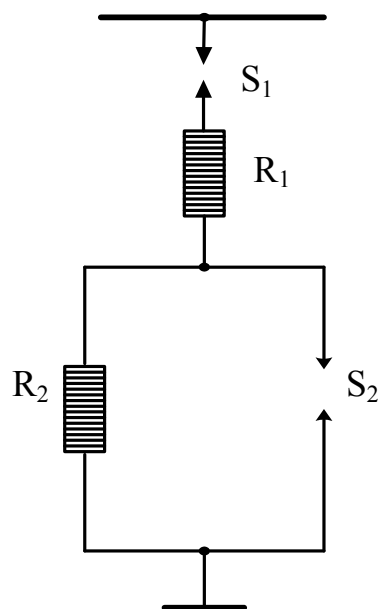


Рис. 9.14. Електрична схема розрядника РВМК

6. РВМ – розрядники вентиляльні з магнітним гасінням дуги. РВМ розроблені замість розрядників РВМК. Як відзначалось раніше, магнітне гасіння дуги дозволило різко збільшити допустиму величину супровідного струму. У свою чергу, це дало можливість змінити величину опору і тим самим знизити залишкову напругу на розряднику, тобто покращити його захисні властивості.

Розрядники серії РВМК і РВМ мають іскрові проміжки з обертовою дугою.

7. РВТ – розрядники вентиляльні струмообмежувальні. Застосовуються для захисту обертових машин і обладнання станцій і підстанцій. У розрядниках РВТ використовуються іскрові проміжки з розтягуючою дугою.

Основні технічні характеристики вентиляльних розрядників наведені в табл. 9.3.

Таблиця 9.3

Характеристики вентиляльних розрядників змінного струму

Тип розрядника	Номінальна напруга, кВ	Найбільша допустима напруга, кВ	Пробивна напруга, діюче значення, кВ, при частоті 50Гц		Імпульсна пробивна напруга (при передрозрядному часі 2-20 мкс), кВ	Залишкова напруга, кВ, на розряднику при імпульсному струмі з довжиною фронту хвилі 10 мкс і амплітудою			Маса, кг
			не менше	не більше		3000А	5000А	10000А	
РВП-3	3	3,8	9	11	21	15	16	-	3,4
РВМ-3	3	3,8	7,5	9,5	8	9	9,5	11	-
РВП-6	6	7,6	16	19	35	28	30	-	4,6
РВМ-6	6	7,6	15	18	15,5	17	18	20	-
РВП-10	10	12,7	26	30,5	50	47	50	-	6,0
РВМ-10	10	12,7	25	30	25,5	28	30	33	-43
РВС-15	15	19	38	48	70	57	61	67	-
РВМ-15	15	19	35	43	57	47	51	57	51
РВС-20	20	25	40	60,5	85	75	80	88	-
РВМ-20	20	25	47	55	74	62	67	74	67
РВС-35	35	40,5	78	98	125	122	130	143	-
РВМ-35	35	40,5	73	84	108	80	97	98	53
РВ-25	25	39	58	70	100	88	94	-	

Вентильні розрядники, на відміну від трубчатих здатні багаторазово обмежувати перенапруги. Зараз важко назвати точну цифру, яка характеризує ресурс роботи РВ, тому що відсутні необхідні статистичні дані. Орієнтовне розуміння цього дає той факт, що в процесі заводських випробувань вентильні розрядники підпадають під багаторазове діяння хвиль перенапруг певної амплітуди і тривалості.

Облік кількості спрацьовувань РВ у процесі експлуатації проводиться за допомогою реєстраторів спрацьовування. Застосовуються два типи реєстраторів:

- РВР – реєстратор вентильних розрядників;
- РР – реєстратор розрядників.

Реєстраторами типу РВР постачаються розрядники РВП, РВО і РВС, тобто розрядники, що мають ІІ з нерухомою дугою і обмежену до 100 А величину супровідного струму. Спрощена електрична схема РВР показана на рис. 9.15.

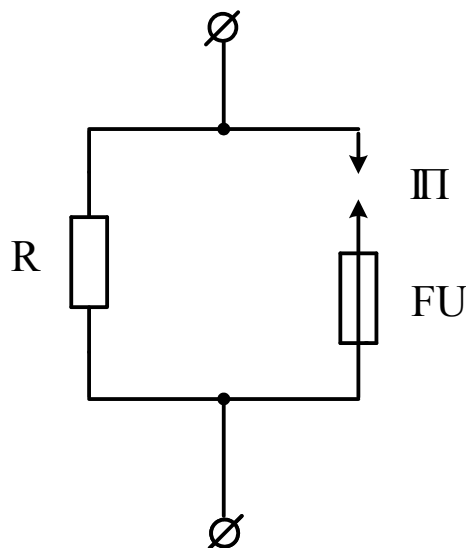


Рис. 9.15. Спрощена електрична схема реєстратора типу РВР

Реєстратор вмикається послідовно з розрядником. При спрацьованні останнього струм, що протікає через резистор R, утворює спад напруги, достатній для пробою проміжку III. При цьому струм прямує на плавку вставку і розплавляє її, що приводить до переміщення храпового механізму реєстратора на один крок і заміни вставки, яка згоріла, на нову. З віссю

храпового механізму пов'язаний диск, на якому є цифри, що вказують кількість спрацювань РВ.

Недоліком реєстратора типу РВР є мала пропускна здатність по супровідному струму ( не більше 100А) і обмежений діапазон вимірювання – до 8 спрацювань РВ (після цього необхідно встановлювати нові плавкі вставки).

Реєстратори типу РР вільні від названих недоліків. Спрощена електрична схема РР наведена на рис. 9.16. Як реєструючий елемент в них використаний звичайний електромеханічний лічильник числа імпульсів. Опір  $R$  – нелінійний, що підвищує надійність роботи реєстратора. Лічильники типу РР випускають на різні границі супровідних струмів – від 10 до 1500 А.

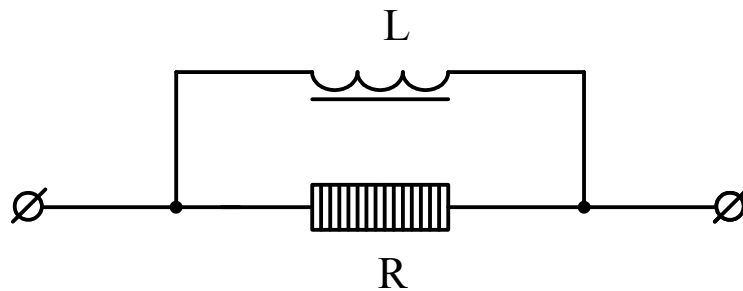


Рис. 9.16. Спрощена електрична схема реєстратора типу РР

#### 9.4. Обмежувачі перенапруг

Для захисту ізоляції електрообладнання від атмосферних та комутаційних перенапруг все більше застосування знаходять обмежувачі перенапруг нелінійні (ОПН). Вони відрізняються від вентиляльних розрядників тільки відсутністю іскрових проміжків і матеріалом нелінійних опорів. Вони виключають короткі замикання, які виникають при спрацьовуванні рогових і трубчатих розрядників під дією атмосферних перенапруг.

ОПН з високонелійними резисторами (варисторами, рис. 9.17) змінюють внутрішній опір в залежності від величини напруги з максимального при номінальній напрузі до мінімального при перенапругах.



Активна частина ОПН складається з послідовно з'єднаних оксидно-цинкових резисторів 4, розміщених в полімерній покривці 3, яка являє собою склопластикову трубу з нанесеною на неї захисною ребристою оболонкою з кремній-органічної гуми. Зверху покривка закрита фланцем 1, на якому кріпиться екран 2, призначений для вирівнювання електромагнітного поля і захисту покривки від перекриття по зовнішній поверхні. Нижній фланець 6 кріпиться на основі 8. заземлення здійснюється за допомогою болта 7, закріпленого на основі.

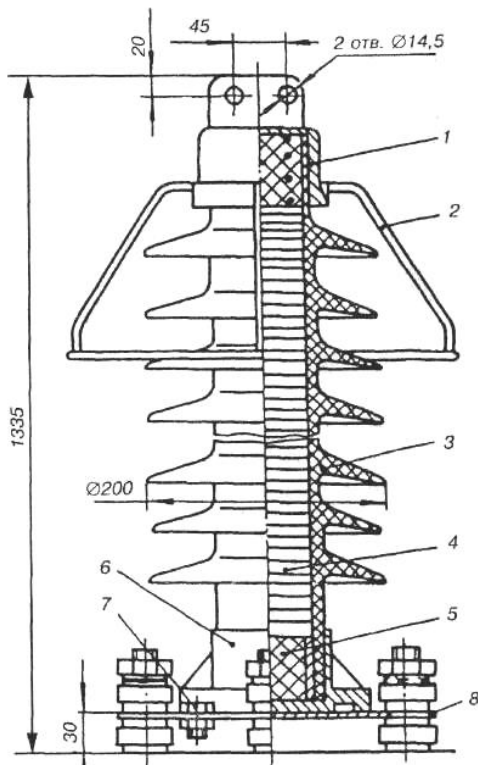


Рис. 9.17. Обмежувач перенапруг типу ОПН-П1-110-ПУХЛ1

В порівнянні з вентильними розрядниками ОПН мають переваги: низький захисний рівень для всіх перенапруг, відсутність супровідного струму після імпульсу, високу питому енергоємність, відсутність необхідності регулювання. Крім того, іскрові проміжки в складі розрядників діють на обладнання, яке захищається, з великою швидкістю зміни напруги, що призводить до розвитку місцевих дефектів ізоляції (часткових розрядів), чого немає в ОПН.

Резистори ОПН, виготовлені на основі оксидно-цинкової кераміки, обмежують комутаційні перенапруги до рівня  $1,8U_{\phi}$  і атмосферні – до рівня  $2,0 - 2,4 U_{\phi}$ .

Такі резистори випускаються у вигляді дисків діаметром від 28 до 85 мм. ОПН виконується шляхом послідовного і паралельного ввімкнення таких резисторів. При робочій напрузі через одну паралельну колонку резисторів протікає струм, що складає частку міліампера, тому необхідність в іскровому проміжку відпадає.

Конструкція деяких з них дозволяє контролювати їх ізоляцію під робочою напругою. Висота ОПН близька до висоти опорних ізоляторів того чи іншого класу напруги. Для виключення заземлення контактних мереж через ОПН, який пошкоджується при прямому ударі блискавки, його підмикають через роговий розрядник з проміжком, замкненим мідним дротом діаметром 1,4 мм.

Основні технічні дані кремнієвих ОПН наведені в табл. 9.4.

Таблиця 9.4

Основні технічні дані кремнієвих ОН

Показник	Тип приладу	
	КСОН-5 КСОН2-5	КСОН-10 КСОН2-10
Номинальна напруга, В	400-2000	1000-2000
Напруга стабілізації, В	400-2000	1000-2000
Клас	4-20	10-20
Інтервали за напругою стабілізації між класами, В	100	100
Середній струм витоку при однонапівперіодній напрузі, рівній 0,9 номінальної, мА	1	1
Максимальна допустима енергія імпульсу навантаження, Дж	5	10
Габаритні розміри, мм		
КСОН	$\frac{125 \times 92 \times 63}{\varnothing 40 \times 19,3}$	$\frac{125 \times 92 \times 63}{\varnothing 40 \times 19,3}$
КСОН2	$\frac{80 \times 75 \times 78,6}{\varnothing 39,5 \times 54,2}$	$\frac{80 \times 75 \times 78,6}{\varnothing 39,5 \times 54,2}$
Маса, кг:		
КСОН	0,7/0,13	0,7/0,13
КСОН2	0,4/0,2	0,4/0,2

Примітка. В чисельнику наведені значення для КСОН з охолоджувачем, в знаменнику – для КСОН без охолоджувача.

## Контрольні питання

1. Дайте визначення грозозахисних розрядників.
2. Поясніть принцип захисту ізоляції за допомогою розрядників.
3. Назвіть основні вимоги до розрядників.
4. Наведіть класифікацію розрядників.
5. Які основні недоліки захисних іскрових проміжків?
6. Де використовуються трубчаті розрядники?
7. Назвіть основні елементи конструкції трубчатих розрядників.
8. Прокоментуйте маркування трубчатих розрядників, наприклад  $PT_{1,8-10}^{35}$ .
9. Назвіть основні недоліки трубчатих розрядників.
10. Сформулюйте призначення вентильних розрядників.
11. З яких основних елементів складається вентильний розрядник?
12. Навіщо створювати проміжки з дугою, що переміщається?
13. Навіщо у вентильних розрядниках використовують нелінійний опір?
14. Назвіть основні недоліки вентильних розрядників.
15. Наведіть приклади типів вентильних розрядників.
16. Чим відрізняються ОПН від вентильних розрядників?
17. Назвіть основні переваги ОПН.

## Розділ 10

# ГРОЗОЗАХИСТ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ І ПІДСТАНЦІЙ

### 10.1. Загальні принципи грозозахисту повітряних ліній

У зв'язку з великою довжиною повітряні лінії електропередачі (ПЛ, ПЛЕП) є найбільш уразливими елементами електричних систем по відношенню до атмосферних перенапруг. При ударах блискавки у ПЛЕП можливе перекриття лінійної або фазної ізоляції і перехід імпульсного перекриття в стійке коротке замикання, наслідком чого є автоматичне відмикання лінії. Нерідкі випадки пошкодження ізоляторів і розщеплення дерев'яних опор.

Основним завданням грозозахисту ПЛЕП є зниження до мінімуму кількості грозових відмикань.

Вибір способів і засобів грозозахисту ПЛЕП проводиться на стадії її проектування. При цьому враховуються такі фактори:

- інтенсивність грозової діяльності в районі прокладання лінії;
- ступінь відповідальності лінії, її номінальна напруга. Лінії високих класів напруги вимагають більш досконалого грозозахисту;
- наявність резервних паралельних ліній. При їх наявності вимоги до грозозахисту кожної з них можуть бути послаблені;
- наявність або відсутність пристроїв АПВ і їх швидкодія. Досвід експлуатації електричних систем показує, що число випадків успішної роботи АПВ при грозових ураженнях ПЛ складає близько 85% в мережах 110 кВ і 90 % в мережах 220 кВ. Ця обставина дозволяє іноді взагалі відмовитись від грозозахисту ПЛ з АПВ, особливо в районах з незначною кількістю гроз;
- конструкція і матеріал опор. Лінії на дерев'яних опорах більш грозостійкі, ніж лінії на металевих і залізобетонних опорах;

- провідність ґрунту в районі прокладання ліній. Сучасні заходи грозозахисту ефективні лише за умови якісного їх заземлення. У районах з високим питомим опором ґрунту (більш  $10^5$  Ом·см) виконання надійного заземлення стає дорогим або взагалі неможливим (наприклад, в скельних ґрунтах). Тому в таких районах грозозахисні заходи можуть не здійснюватись або здійснюватись частково;
- режим нейтралі даної мережі. У мережах 35 кВ і нижче з компенсованою нейтраллю однофазні імпульсні перекриття не приводять до виникнення стійкої силової дуги. Тому наявність дугогасильної котушки може розглядатись як додатковий захід грозозахисту таких мереж.

Основним заходом грозозахисту ПЛ є тросові блискавковідводи. Найбільш ефективним є захист ПЛ тросом по всій довжині. При відсутності троса кількість грозових відмикань, викликаних короткими замиканнями на лінії, значно зростає. В електричних системах з великими струмами короткого замикання часті замикання можуть привести до перегорання проводів. Крім того, в таких системах при коротких замиканнях зростає небезпека пошкодження трансформаторів динамічними зусиллями в обмотках.

Разом з тим тросовий захист ПЛ має і недоліки. Так, в районах з посиленою ожеледдю спостерігались випадки обриву тросів і падіння їх на проводи, що викликало важкі аварії.

Другим недоліком тросового захисту є те, що троси зазнають корозії сильніше, ніж проводи. Тому аварії, викликані обривами троса, бувають частіше, ніж аварії через обрив проводів. Нарешті, тросовий захист виявляється неефективним в районах, де трудно забезпечити величину опору заземлення опор менше 30-40 Ом. Тому ПУЕ передбачають у ряді випадків відмову від захисту тросом по всій довжині ліній 110 і 220 кВ на металевих і залізобетонних опорах. Спорудження ліній без тросів допускається:

- в районах з числом грозових годин на рік менше 20;
- на окремих ділянках в особливо ожеледних районах;
- на окремих ділянках зі скельним ґрунтом.

ПЛ 110; 220 кВ на дерев'яних опорах мають високий рівень грозостійкості і тросовим захистом по всій довжині, як правило, не обладнуються. На таких лініях троси підвішуються лише на підходах до підстанцій на ділянці 1-3 км. Те ж саме стосується і ПЛ 35 кВ на металевих опорах.

Розподільні електричні мережі напругою 6 і 10 кВ взагалі не мають тросового захисту.

## 10.2. Критерії грозостійкості повітряних ліній

Грозостійкість ПЛ характеризується двома критеріями:

- захисним рівнем лінії (рівнем грозостійкості)- $I_{63}$ ;
- питомим числом грозових відмикань –  $n$ .

Захисним рівнем лінії називається найбільший струм блискавки, при якому ще не відбувається перекриття лінійної ізоляції. Величина захисного рівня залежить:

- від робочої напруги лінії: чим вона вище, тим міцніше ізоляція лінії і тим, отже, більше захисний рівень;
- від матеріалу опор: лінії на дерев'яних опорах мають захисний рівень набагато вищий, ніж лінії на металевих або залізобетонних опорах.

Згідно з ПУЕ, рівень ізоляції ліній обирається виходячи з розрахункової кратності внутрішніх перенапруг. При цьому трохи зростає імовірність грозових відмикань ліній, однак наявність АПВ і резервування мереж компенсує цей недолік.

Розрахунок рівня грозостійкості повітряних ліній можна проводити за методикою, викладеною в [12, 13].

Питоме число грозових відмикань визначається для 100 км лінії за рік.

Для відмикання ПЛ релейним захистом (РЗ) при грозовому ураженні необхідне одночасне виконання двох умов:

- величина струму блискавки повинна перевищувати захисний рівень лінії, тому що тільки в цьому разі відбудеться перекриття ізоляції;
- іскровий розряд мусить перейти в силову дугу, тоді спрацює РЗ.

Позначимо імовірність виконання першої умови через  $\psi$ , а другої  $\eta$ .

Величину  $\psi$  легко визначити, скориставшись виразом (7.2) і замінивши в ньому струм блискавки  $I_6$  на захисний рівень  $I_{63}$ :

$$\psi = 10^{-\frac{I_{63}}{60}}. \quad (10.1)$$

Імовірність  $\eta$  залежить головним чином від рівня середньої напруженості  $E_{\text{сер}}$  електричного поля, створюваної робочою напругою лінії по шляху перекриття: чим більше  $E_{\text{сер}}$ , тим більше  $\eta$ . Величина  $E_{\text{сер}}$  визначається за формулою

$$E_{\text{сер}} = U_{\text{лін}}/l, \quad (10.2)$$

де  $U_{\text{лін}}$ - лінійна напруга;  
 $l$ - сумарний шлях перекриття.

Імовірність  $\eta$  (коефіцієнт переходу імпульсного перекриття в дугу промислової частоти) для ліній на дерев'яних опорах визначається за формулою

$$\eta = (1.5E_{\text{сер}} - 4) \cdot 10^{-2}. \quad (10.3)$$

Добуток  $\psi \cdot \eta$  є не що інше, як імовірність відмикання лінії РЗ при ударі блискавки.

Очевидно, що питоме число грозових відмикань ЛЕП дорівнює добутку числа прямих ударів блискавки в лінію на імовірність відмикання лінії релейним захистом при ударі блискавки.

В електроенергетиці прийнято визначати кількість ПУБ, що припадають на 100 км лінії за рік ( $N$ ). Для підрахунку  $N$  необхідно знати імовірність ураження блискавкою  $1 \text{ км}^2$  поверхні землі за 1 годину грози ( $P$ ). Цей параметр визначено в п. 7.3. Установлено, що ширина смуги  $S$ , з якої лінія електропередачі „приймає” на себе ПУБ, дорівнює приблизно  $6h_{\text{ср}}$ , де  $h_{\text{ср}}$  - середня висота підвісу проводів лінії. У цьому випадку кількість ударів блискавки в лінію протягом року складає

$$N = P6h_{\text{cp}}LN_{\text{гр}} \cdot 10^{-3}, \quad (10.4)$$

де  $P$  - імовірність ураження блискавкою  $1 \text{ км}^2$  поверхні землі за 1 годину грози;

$h_{\text{cp}}$  - середня висота підвісу проводів;

$L$  - довжина лінії;

$N_{\text{гр}}$  - число грозових годин на рік для даної місцевості.

Приймаючи  $P = 0,07$ ;  $L = 100 \text{ км}$ ,  $N_{\text{гр}} = 80$  отримаємо

$$N = 0,07 \cdot 6h_{\text{cp}} \cdot 100 \cdot 80 \cdot 10^{-3} \approx (3-4)h_{\text{cp}}. \quad (10.5)$$

Остаточно для підрахунку питомого числа грозових відмикань отримаємо

$$N = (3-4)h_{\text{cp}} \cdot \eta \cdot \psi. \quad (10.6)$$

Розглянута методика дозволяє ще на стадії проектування ПЛ підрахувати очікуване число грозових відмикань, оцінити можливий збиток, завданий цими відмиканнями, і в разі необхідності вжити заходів для підвищення рівня грозостійкості лінії електропередачі.

### 10.3. Захист місць перетинів повітряних ліній

При виконанні грозозахисних заходів особливу увагу приділяють захисту місць перетинів ЛЕП. Якщо одна з перехресних ліній має номінальну напругу  $110 \text{ кВ}$  і вище, то розрахунковим випадком є удар блискавки в проліт перетину.

Перетини ЛЕП однакових чи різних класів напруг, а також з лініями зв'язку, через близькість проводів ослаблюють ізоляцію в місцях перетину. Грозове перекриття місць перетинів може привести до важких післядій, а саме:

- перекриття між лініями різних напруг викликає пошкодження ізоляції обладнання, підімкненого до лінії з меншою напругою;



- перекриття між ЛЕП і лініями напругою 0,4 кВ, а також лініями зв'язку може привести до ураження й загибелі людей;
- перекриття ліній напругою 220 кВ і вище викликає важкі системні аварії через неселективну роботу релейного захисту.

Захист місць перетинів забезпечується вибором необхідної відстані між проводами перехресних ліній, а також шляхом зниження розрядної напруги на землю на опорах, що обмежують проліт перетину. Останнє необхідне для зрізання хвиль перенапруг, що набігають з ЛЕП, і для обмеження напруги на проміжку  $S$  при ПУБ в проліт перетину.

При прямому ударі блискавки в проліт перетину напруга на проводі в точці перетину буде змінюватись так, як це показано на рис. 10.1. Такий характер зміни напруги обумовлений тим, що після перекриття ізоляції на опорі хвиля перенапруги відбивається як від короткозамкненого кінця, тобто в протифазі. Тому, починаючи з деякого моменту часу  $t_1$ , що визначається (при постійній швидкості хвилі) відстанню  $l$  від точки перетину до опори, відбита хвиля почне обмежувати напругу на проміжку  $S$ .

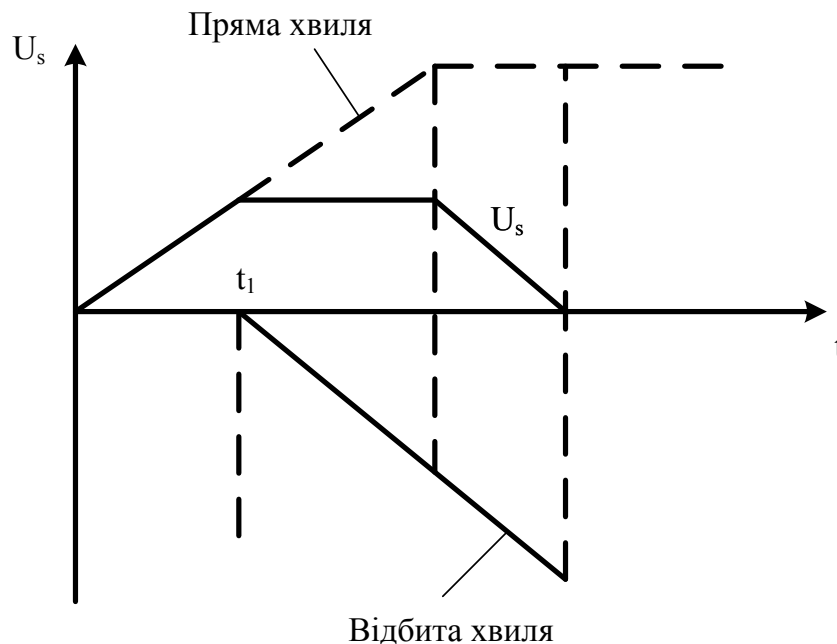


Рис. 10.1. Графік зміни напруги на проводі в місці перетину

Очевидно, чим менше  $l$ , тим швидше це відбудеться і тим в більш легких умовах опиниться проміжок  $S$ . Тому на практиці завжди намагаються місце перетину виконати ближче до однієї з опор.

Зниження розрядної напруги на опорах, які обмежують проліт перетину, проводять тільки для ЛЕП на дерев'яних опорах. Робиться це встановленням на цих опорах трубчатих розрядників або захисних іскрових проміжків. Лінії на металевих опорах та лінії з тросами і без додаткових заходів мають рівень ізоляції на опорах значно нижчий, ніж проміжок  $S$ .

Спеціального захисту місць перетинів не потрібно, якщо відстань між проводами ліній, що перетинаються, більше таких величин:

для ЛЕП 220 кВ, що перетинаються з лініями 220 кВ і нижче, – 6 м;  
для ЛЕП 35 і 110 кВ, що перетинаються з лініями 6; 10кВ, – 5м;  
для ЛЕП 35 кВ, що перетинаються між собою і з лініями менше 35 кВ, – 4м.

#### **10.4. Загальні принципи грозозахисту підстанцій**

Рівень ізоляції обладнання електричних станцій і підстанцій нижче рівня ізоляції ліній електропередачі. При грозових ураженнях ЛЕП по них можуть розповсюджуватись імпульсні електромагнітні хвилі, безпечні для самих ліній, але небезпечні для обладнання підстанцій (трансформаторів, обертових машин тощо). Тому підстанційне обладнання вимагає спеціальних заходів грозозахисту.

Основним засобом захисту від хвиль перенапруг, що набігають на підстанцію, є вентильні розрядники. Надійний захист за допомогою РВ можливий при дотриманні трьох умов:

- вольт-секундна характеристика розрядника повинна всіма своїми точками лежати нижче вольт-секундної характеристики захищеної ізоляції;
- виміряна по проводах відстань між РВ і захищуваним обладнанням не повинна перевищувати певної величини  $l$ ;

– імпульсний струм, що протікає через РВ при його спрацьовуванні, не повинен перевищувати максимально допустиме для даного розрядника значення (5 або 10 кА).

Розглянемо другу і третю умови більш детально. Покажемо, що надійність захисту залежить від відстані, на якій він установлений від захищованого об'єкта. Найпростіше це показати на прикладі тупикової підстанції (рис. 10.2).

Напруга  $U$ , яка проходить за розрядник після його спрацьовування, очевидно, дорівнює

$$U = a \cdot t_p, \quad (10.7)$$

де  $a$  – крутість фронту набігаючої хвилі;

$t_p$  – час від моменту набігання хвилі до моменту спрацьовування розрядника.

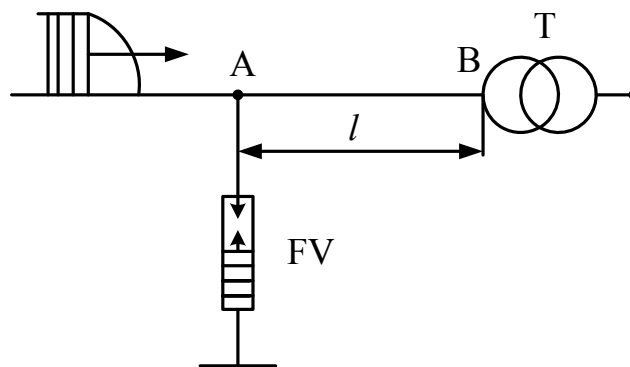


Рис. 10.2. Вибір відстані від вентильного розрядника до об'єкта, що захищається

При цьому, оскільки підстанція тупикова, то до ізоляції буде прикладена напруга  $U_{iz}$ , що дорівнює  $2a \cdot t_p$  (за рахунок повного відбиття хвилі у фазі). Ясно, що зменшуючи  $t_p$ , можна знизити і напругу на ізоляції.

Зменшення  $t_p$  можна досягти, наближаючи розрядник до захищованого об'єкта. Справді, якщо РВ стоїть близько від точки В (рис. 10.2), то час його спрацьовування зменшується, тому що величина напруги пробою розрядника  $U_p$  буде досягнена швидше

за рахунок складання прямої і відбитої хвиль. Позначивши через  $\tau$  час пробігу хвилі зі швидкістю  $V$  відстані  $l$ , можна записати

$$U_p = a \cdot t_p + a(t_p - 2\tau). \quad (10.8)$$

З (10.8) виходить

$$t_p = (U_p + 2a \cdot \tau) / 2a. \quad (10.9)$$

Таким чином, чим менше  $\tau$ , тим менше  $t_p$ . Але  $\tau = l/V$ , отже, чим ближче встановлений розрядник до захищуваного обладнання, тим менша напруга буде прикладена до ізоляції після його спрацьовування.

Знаючи величину імпульсної пробивної напруги ізоляції  $U_{\text{іздоп}}$  і використовуючи вираз (10.9), можна отримати формулу для визначення максимально допустимої відстані від РВ до захищуваного об'єкта:

$$l_{\text{доп}} \leq [(U_{\text{іздоп}} - U_p) V] / 2a. \quad (10.10)$$

Таблиця допустимих відстаней від РВ до трансформаторів наведена, наприклад в [30].

Звичайно РВ устанавлюють по одному на кожен фазу і захищають усе обладнання підстанції. При цьому для інших апаратів умова (10.10) може опинитись невиконаною, що безумовно небажано.

З (10.10) видно, що захисна зона РВ розширюється при зменшенні  $a$ . Отже, для надійного захисту всієї ізоляції підстанції одним комплектом РВ необхідно обмежити крутість фронту набігаючих хвиль. Для ЛЕП, які мають тросовий захист, ця умова виконується автоматично, тому що хвилі з великою крутістю виникають лише при прямих ударах блискавки в провід. Лінії 35-220 кВ, які не мають тросового захисту по всій довжині, обладнуються тросами на підходах до підстанцій на ділянці 1-3 км; тим самим виключаються ПУБ на цій ділянці, а віддалені ПУБ будуть безпечні, оскільки, пробігаючи по проводах шлях в 1-3 км, хвилі деформуються, згладжуються за рахунок втрат на імпульсну корону.

Раніше відзначалось, що вентиляльні розрядники не витримують імпульсних струмів, які перевищують певну величину – 5 або 10 кА. У той же час струм блискавки в багато разів може перевищувати вказані значення. Тому надійний захист ізоляції підстанційного обладнання за допомогою РВ можливий лише при умові ефективного обмеження амплітуди хвиль перенапруг, які набігають на підстанції.

На лініях 35-220 кВ з дерев'яними опорами, які мають захист від ПУБ на підходах до підстанцій, зниження величини струму блискавки до безпечних значень для РВ здійснюється установленням трубчатих розрядників. На лініях з металевими і залізобетонними опорами встановлювати трубчаті розрядники немає необхідності, тому що зрізання хвилі тут відбувається за рахунок перекриття порівняно низького рівня лінійної ізоляції.

### **10.5. Типові схеми грозозахисту підстанцій**

Типова схема грозозахисту підстанцій 35-220 кВ з лініями на дерев'яних опорах подана на рис. 10.3. У відповідності до викладеного в п. 10.4 ця схема містить у собі:

- грозозахисний трос, установлений на підході до підстанції на ділянці в 1-3 км, і призначений для обмеження крутості фронту хвиль атмосферних перенапруг;
- комплект трубчатих розрядників РТ1, установлений на першій з боку лінії підтросовій опорі і призначений для обмеження струмів блискавки, що протікають через вентиляльні розрядники. Якщо опір заземлення розрядників РТ1 перевищує 15 Ом, то на наступній підтросовій опорі встановлюють комплект розрядників РТ3, які додатково зрізають набігаючу хвилю;
- комплект трубчатих розрядників РТ2, установлений на найближчій до підстанції опорі (або навіть на порталах) і призначений для захисту ізоляції підстанції у випадку, коли лінія під час грози відімкнена. Тоді від її відімкненого кінця хвиля відбивається у фазі, напруга подвоюється і можливий пробій ізоляції вимикача

(роз'єднувача). Якщо при цьому підстанція підімкнена з другого кінця, то не виключено виникнення к.з. Вольт-секундна характеристика розрядників РТ2 повинна лежати на 15-20 % вище вольт-секундної характеристики розрядників РТ1 (РТ3);

- комплект вентильних розрядників РВ, установлений на території підстанції у відповідності до умови (10.10) і призначений для захисту ізоляції підстанційного обладнання.

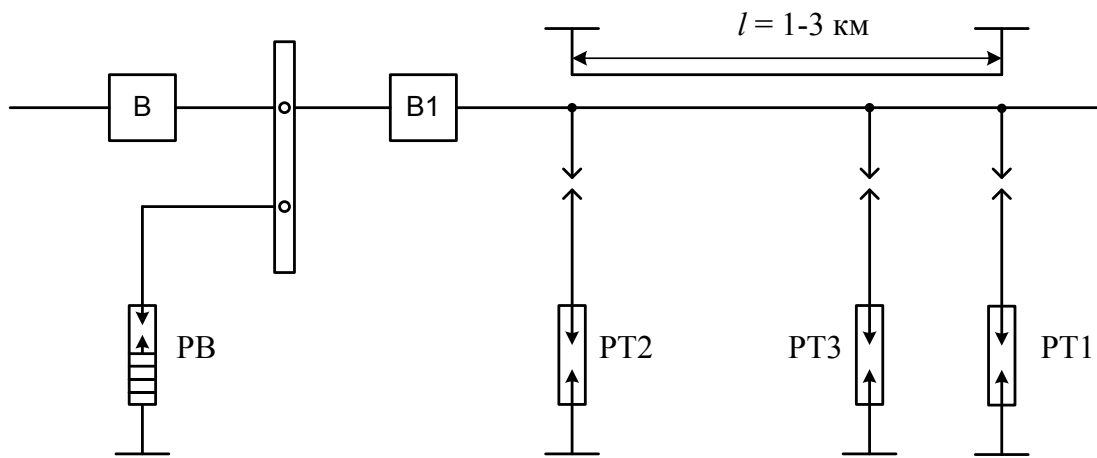


Рис. 10.3. Типова схема грозозахисту підстанцій 35-220 кВ з ЛЕП на дерев'яних опорах

Для підстанцій 35-220 кВ, підімкнених до ЛЕП на металевих або залізобетонних опорах, схема грозозахисту спрощується за рахунок вилучення трубчатих розрядників (їх роль, як уже говорилось, виконує лінійна ізоляція ЛЕП).

Тросовий захист для ЛЕП 35 кВ установлюється в цьому випадку на підході до підстанції. ЛЕП 110, 220 кВ обов'язково захищаються тросом по всій довжині.

Лінії електропередачі напругою 6 і 10 кВ виконуються звичайно на дерев'яних опорах і тросами не захищаються. Для захисту підстанцій, підімкнених до таких ЛЕП, установлюються два комплекти РТ: один – безпосередньо на кінцевій опорі біля підстанції, а другий – на відстані 100-200 м від першого. Призначення цих розрядників аналогічно призначенню РТ у схемі захисту підстанцій 35-220 кВ з ЛЕП на дерев'яних опорах.

Захист ізоляції підстанційного обладнання здійснюється, як звичайно, вентиляними розрядниками.

Дуже часто ввід повітряних ЛЕП у підстанції 6-10 кВ проводиться через кабельні вставки. У цьому випадку комплект РТ встановлюють перед кабельною вставкою, причому заземлення найближчого до кабельної воронки розрядника обов'язково приєднується до металевої оболонки кабелю; тоді при спрацьовуванні РТ провід з'єднуються з оболонкою і імпульсний струм, еквівалентний змінному струму високої частоти, витісняється внаслідок поверхневого ефекту на оболонку кабелю, наводячи в його жилах ЕРС, що перешкоджає проникненню імпульсного струму в жили.

Якщо довжина кабельної вставки перевищує 50 м, то в місці приєднання кабелю до ПЛ треба встановлювати комплект вентиляних розрядників.

Схеми грозозахисту підстанцій 6-10 кВ для двох розглянутих випадків (з кабельною вставкою і без неї) наведені на рис. 10.4 і 10.5.

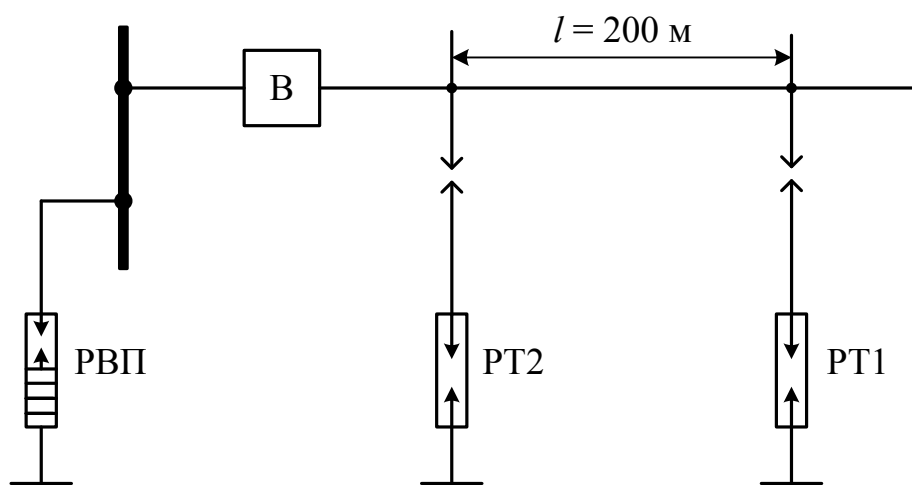


Рис. 10.4. Схема грозозахисту підстанцій 6-10 кВ

Підстанції, підімкнені за допомогою відпайок (без вимикача), мають свої особливості захисту в залежності від матеріалу опор ЛЕП і довжини відпайки (до 150 м; 150-500 м; більше 500 м). При металевих і залізобетонних опорах ЛЕП захист відпайки здійснюється тросами. При дерев'яних опорах схеми захисту мають вигляд, показаний на рис. 10.6, а (відпайка

до 150 м) і 10.6, б (відпайка 150-500 м). Якщо довжина відпайки перевищує 500 м, то її захист здійснюється відомими способами, тобто відпайка розглядається як звичайна ЛЕП.

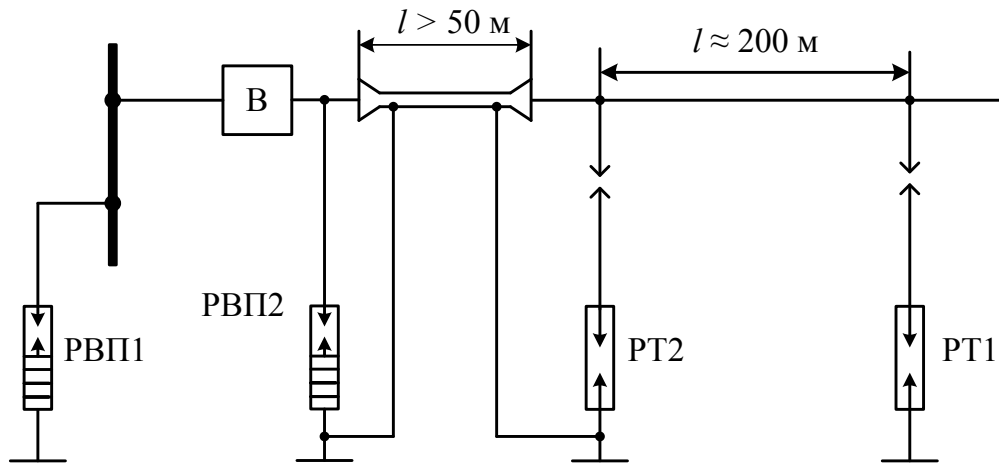


Рис. 10.5. Схема грозозахисту підстанцій 6-10 кВ при наявності кабельної вставки

Особливо захищаються від атмосферних перенапруг підстанції, на яких установлені електричні машини, безпосередньо підімкнені до ЛЕП. Рівень ізоляції обертових машин значно менший, ніж інших високовольтних пристроїв відповідних класів напруги, і в багато разів менший, ніж лінійної ізоляції. Це утруднює надійний захист обертових машин.

Допускається безпосереднє вмикання на повітряну лінію машин потужністю не більше 25 МВт (25МВА), якщо лінія з дерев'яними опорами, і 50 МВт (50МВА), якщо лінія з металевими або залізобетонними опорами. При цьому повинен бути забезпечений рівень грозостійкості схеми захисту не нижче 50 кА. Такого стану вдається досягти шляхом більш ретельного виконання захисту підходів до підстанції: установленням стержневих і тросових блискавковідводів, зниженням опору заземлення трубчатих розрядників і т. ін. Безпосередній захист ізоляції машин проводять спеціальні вентиляльні розрядники (РВВМ, РВМ, РВМГ), паралельно яким звичайно вмикають конденсатори з ємністю порядку 0,5 мкФ на фазу. Конденсатори знижують крутість хвиль, що набігають, до значень, безпечних для виткової ізоляції.



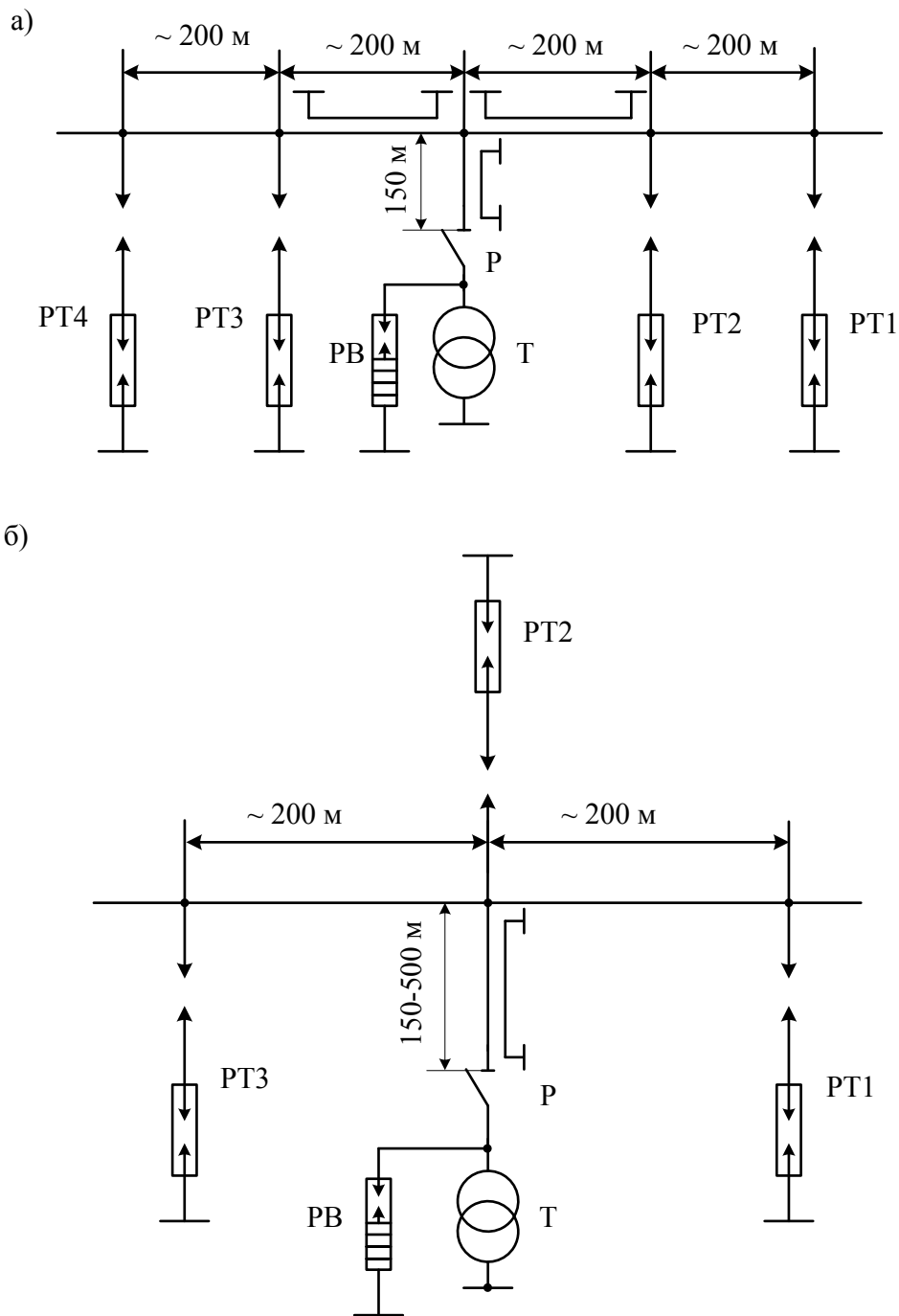


Рис. 10.6. Схема грозозахисту підстанцій, що підімкнені відпайками

Конкретні способи захисту обертових машин досить різноманітні і залежать, крім усього іншого, від типу машини, наявності в схемі кабельної вставки, лінійного реактора і т.ін. Деякі з цих способів наведені в [1]. На рис. 10.7 наведені варіанти

схем захисту обертових машин безпосередньо підімкнених до ЛЕП:

- а) з підходом, захищеним тросом на протязі не менше 300м;
- б) з підходом, захищеним тросом на довжині 100-150м;
- в) з кабельною вставкою на підході.

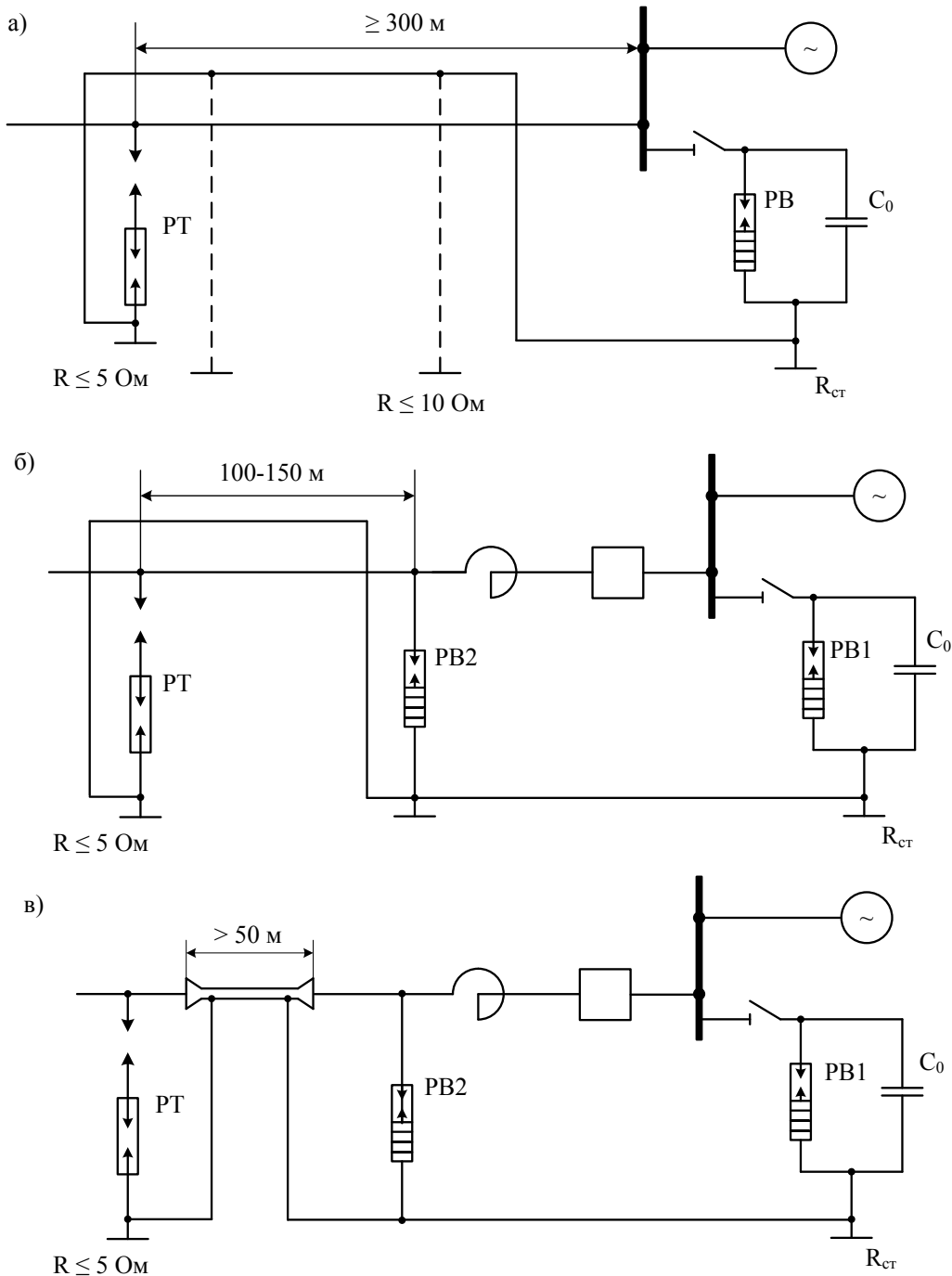


Рис. 10.7. Схеми захисту обертових машин від грозивих перенапруг

Обертів машини, потужність яких перевищує зазначену, повинні приєднуватися до мережі через розділові трансформатори. У цьому випадку захист трансформатора, що виконується звичайними способами, забезпечує надійний захист машини.

Зараз велика увага приділяється питанням захисту від перенапруг низьковольтного обладнання, а також електроприймачів, що реагують на короткочасні імпульсні перенапруги.

Перехід перенапруг в мережу 0,4 кВ відбувається головним чином через силові трансформатори, хоч можливі й інші шляхи переходу (наприклад, занесення високих потенціалів через загальні контури заземлення, наведення від близьких розрядів блискавки або інших електромагнітних випромінювань).

Досвід показує, що величини перенапруг в мережі 0,4 кВ можуть досягати 1000 і більше вольт, причому найбільш небезпечними, зважаючи на порівняну велику тривалість, є перенапруги внутрішні (комутаційні, дугові, резонансні).

Для захисту низьковольтного обладнання від перенапруг використовуються спеціальні низьковольтні вентильні розрядники типу РВН-0,5.

Більш складною є проблема захисту від короткочасних перенапруг електроприймачів (різного роду автоматичних і лічильних розв'язувальних пристроїв на півпровідниках). У наш час це питання вирішується, як правило, конкретно для кожного типу апаратури.

### **Контрольні питання**

1. Які наслідки можливі при ударах блискавки у повітряні ЛЕП?
2. Сформулюйте основне завдання грозозахисту ПЛЕП.
3. Які фактори враховуються при виборі способів і засобів грозозахисту ПЛЕП на стадії її проектування?
4. Який основний засіб грозозахисту ПЛ?
5. Які лінії по всій довжині не захищаються тросом?

6. Коли допускається спорудження лінії без тросів?
7. Назвіть і прокоментуйте критерії грозостійкості повітряних ліній.
8. Як визначається кількість ПУБ, що припадають на 100 км лінії за рік?
9. Як здійснюється захист місць перетинів повітряних ліній?
10. Який основний засіб захисту від хвиль перенапруг, що набігають на підстанції?
11. При яких умовах можливий надійний захист за допомогою вентиляльних розрядників?
12. Яким чином надійність захисту за допомогою вентиляльного розрядника залежить від відстані, на якій він установлений від об'єкта, що захищається?
13. Як збільшити захисну зону вентиляльного розрядника?
14. Наведіть схему грозозахисту підстанцій 35-220 кВ з лініями на дерев'яних опорах і поясніть призначення окремих елементів схеми.
15. Чим відрізняється схема грозозахисту підстанцій 35-220 кВ з лініями на металевих або залізобетонних опорах від схеми грозозахисту тих же підстанцій з лініями на дерев'яних опорах?
16. Як здійснюється грозозахист підстанцій з лініями 6(10) кВ?
17. Як здійснюється грозозахист підстанцій, у яких ввід повітряних ЛЕП проводиться через кабельні вставки?
18. Сформулюйте особливості грозозахисту підстанцій, які підімкнені за допомогою відпайок.
19. Назвіть особливості грозозахисту підстанцій, на яких встановлені електричні машини, безпосередньо підімкнені до ЛЕП.
20. Яким чином здійснюється перехід перенапруг в мережу 0,4 кВ?

## Розділ 11

# ЗАХИСТ ВІД ПЕРЕНАПРУГ ПРИСТРОЇВ І УСТАТКУВАНЬ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ І ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ

### 11.1. Принцип координації ізоляції

Ізоляція нового обладнання в заводських умовах випробовується більш високою напругою, ніж під час експлуатації. Випробна напруга, якою ізоляція обладнання перевіряється на заводі, називається рівнем ізоляції даного обладнання. За мінімальний рівень ізоляції приймають напругу, якою обладнання періодично випробовується під час експлуатації при профілактичних ремонтах.

Параметри захисних пристроїв від перенапруг повинні бути вибрані таким чином, щоб забезпечити обмеження перенапруг в границях мінімального рівня ізоляції. Це узгодження мінімального рівня ізоляції з параметрами захисних пристроїв від перенапруг називається принципом координації ізоляції.

Ефективність дії захисного пристрою визначається захисним рівнем, який являє собою найбільшу напругу, що виникає на його затискачах під час дії перенапруг. Співвідношення між захисним рівнем і мінімальним рівнем ізоляції вибирається з урахуванням електротехнічних характеристик ізоляційних матеріалів, умов експлуатації обладнання та якості відновлювальних профілактичних ремонтів. При виборі захисного рівня враховується те, що під час експлуатації імпульсна міцність ізоляції може знижуватися.

Координація ізоляції повинна бути рівним способом здійснена як в мокрому, так і в сухому стані.

При координації ізоляції суттєву роль відіграють організаційно-технічні заходи, що забезпечують підтримання ізоляції обладнання в нормальному стані (чищення ізоляторів, сушіння та регенерація масла і т. ін), а також профілактичні випробування ізоляції обладнання, які проводяться звичайно після періодичних ремонтів з метою визначення електричної міцності.

На ізоляцію діє перш за все робоча напруга. Розрахункову робочу напругу приймають за правилом, що визначене в п.6.1.

Крім того, на ізоляцію діють і внутрішні перенапруги. Розрахункові кратності внутрішніх перенапруг вибирають у відповідності до застосовуваних типів захисних пристроїв; у випадку застосування ОПН розрахункові кратності внутрішніх перенапруг понижуються.

Дія грозових перенапруг відрізняється від дії внутрішніх перенапруг ефектами відбиття хвиль, що набігають, від кінця лінії із збільшенням (до подвоєння) амплітуди перенапруги. Оскільки захисні пристрої встановлюють на деякій відстані від обладнання, що захищається, то при виборі розрахункових значень грозових перенапруг залишкову напругу на розряднику (або ОПН) помножують на коефіцієнт, який враховує перепад напруги між розрядником і об'єктом, що захищається. Звичайно коефіцієнт приймають рівним 1.2 для силових трансформаторів і 1.3-1.4 для решти обладнання.

Для ліній електропередачі координація ізоляції передбачає такий її вибір, при якому забезпечується досить мале середнє число перекриття і потрібний строк служби з урахуванням забруднення і зволоження ізоляції. Звичайно приймають середнє число перекриття ізоляції для ліній рівним 1 раз за 10 років.

Для ізоляції підстанцій у зв'язку з високою вартістю обладнання показник надійності приймається значно більш високим, рівним одній відмові за 50-100 років.

## **11.2. Особливості захисту від перенапруг обладнання тягових підстанцій**

Відмова обладнання тягових підстанцій може привести до порушення електропостачання ділянки залізниці, тривалого простою споживачів, перерви руху поїздів і т.ін. Тому грозозахист тягових підстанцій повинен бути виконаний дуже надійно.

Від ПУБ на підстанціях захищаються стержневими блискавковідводами основні споруди, електрообладнання,

відкриті розподільні устаткування (ВРУ), склади паливно-мастильних матеріалів та ін.

Тросові блискавковідводи для захисту від ПУБ на підстанціях застосовувати не рекомендується. Їх можливе застосування обмежується захистом окремих частин підстанції.

Тросові блискавковідводи найчастіше використовуються для захисту повітряних ЛЕП (на всій протяжності або на підходах до підстанцій). Особливості такого застосування тросових блискавковідводів визначені в п. 8.3.2 та розд. 10.

Для виключення заносу високих потенціалів на електрообладнання підстанцій через загальні контури заземлення або внаслідок пробою земляного проміжку між заземленнями блискавковідводу і підстанції передбачають конкретні заходи: обмеження місць встановлення блискавковідводів з індивідуальними заземленнями, дотримання певних відстаней між приєднаннями до загального контуру заземлення заземлень блискавковідводів і трансформаторів і т. ін.

Для захисту від хвиль перенапруг, що набігають на підстанцію, встановлюють вентиляльні розрядники або обмежувачі перенапруг нелінійні. Особливості їх застосування наведені в пп. 9.3, 9.4.

Для обмеження перенапруг, що проникають на тягові підстанції по живильних лініях постійного струму, і захисту відповідного обладнання від цих перенапруг використовують вентиляльні розрядники, які підмикаються до кожного фідера з боку контактної мережі і до шин підстанції (рис. 11.1). Розрядники постійного струму на живильних лініях FV1 типів РМБВ, РМВУ призначені для обмеження перенапруг у випадку відімкненого вимикача фідера, оскільки хвиля перенапруги, відбиваючись від розімкненого кінця лінії, подвоюється. Головну роль в обмеженні перенапруг виконують розрядники постійного струму FV2 типів РВПК, РВПКН. Вони мають меншу вставку і здатні обмежувати потужні імпульси перенапруг. У районах з інтенсивною грозовою діяльністю рекомендується підмикати до шин підстанції декілька таких розрядників, це зменшує величину залишкової напруги.

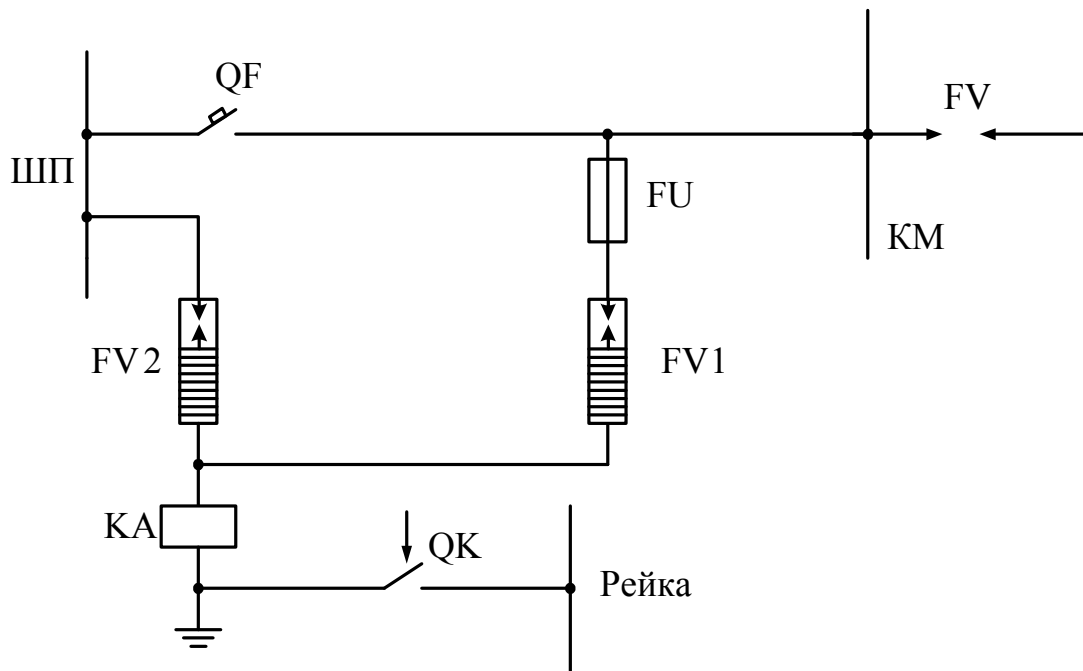


Рис. 11.1. Схема захисту обладнання тягових підстанцій постійного струму від хвиль перенапруг, що набігають по живильних лініях:

ШП – головна шина підстанції; QF – швидкодіючий вимикач; FV – роговий розрядник; FU – запобіжник; КА – реле земляного захисту; QK – короткозамикач; КМ – контактна мережа; FV1, FV2 – вентильні розрядники

Основна відзнака розрядників постійного струму від розрядників змінного струму полягає в тому, що для гасіння дуги в розряднику, яка виникає під дією перенапруг, застосовується магнітне дуття. Створення магнітного дуття, як і у швидкодіючих вимикачах постійного струму, викликано тим, що дуга постійного струму, що виникає, горить дуже стабільно, оскільки струм не переходить через нульове значення. Магнітне дуття створює необхідні умови для деіонізації дуги в розряднику.

Конструкцію розрядників постійного струму розглянемо на прикладі розрядника РВМУ-3,3 (рис. 11.2). Він складається з фарфорового корпусу 1, двох іскрових проміжків 6, двох дисків нелінійного опору 4, стиснутих разом з іскровими проміжками і магнітами 7 пружиною 3. Герметичність розрядника забезпечується кільцевими прокладками 2, виготовленими з



озоно- і морозостійкої гуми. Фетрові прокладки 5 на дисках нелінійного опору запобігають горизонтальному переміщенню цих дисків. Клапан 8 призначений для запобігання вибуху корпусу при пошкодженнях розрядника. Він спрацьовує при перевищенні тиску усередині корпусу, рівному  $5\text{ кг/см}^2$ .

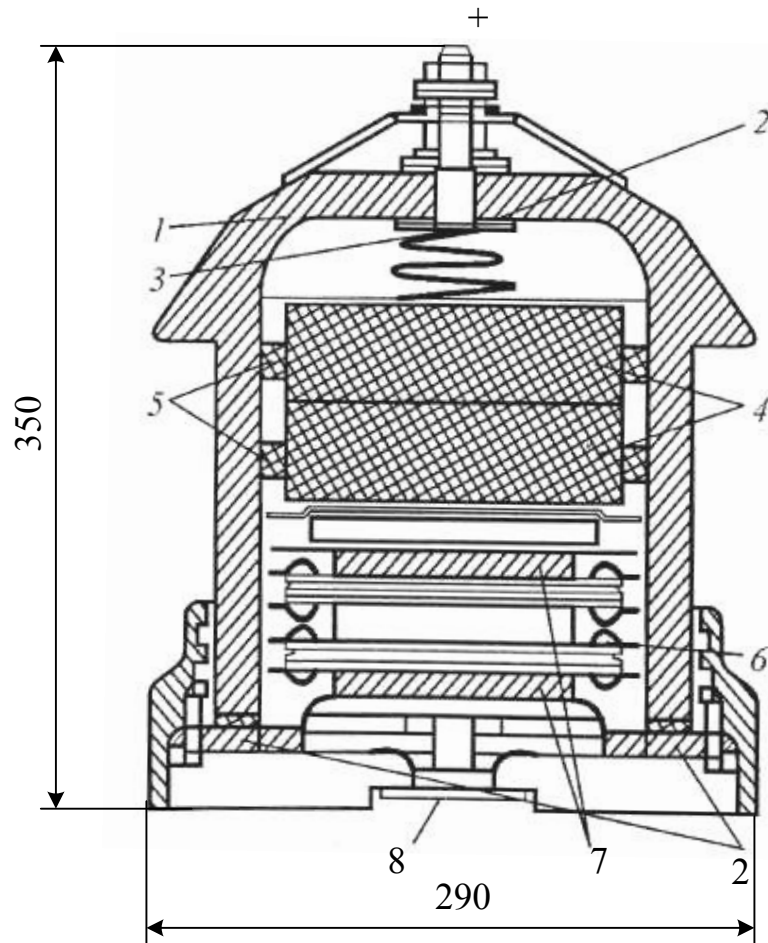


Рис. 11.2. Конструкція розрядника РМВУ – 3,3

Основні технічні характеристики вентиляних розрядників постійного струму наведені в табл. 11.1.

Вентильні розрядники як змінного, так і постійного струму мають обмежений ресурс роботи. Після його закінчення проводять розбирання розрядників і заміну дисків нелінійних опорів.

Таблиця 11.1

## Характеристики вентильних розрядників постійного струму

Показник	Тип розрядника		
	РМВУ-3,3	РВПК-3,3	РВПКН-3,3
Номинальна напруга, кВ	3,3	3,3	3,3
Найбільша робоча напруга, кВ	4,2	4,1	4,1
Пробивна напруга іскрових проміжків (діюче значення), кВ, при змінному струмі з частотою 50 Гц	10,5-13	7,5-8,5	7,5-8,5
Імпульсна пробивна напруга при передрозрядному часі 2-20 мкс, кВ, не більше	14,5	9,0	9,0
Залишкова напруга на розряднику, кВ, при імпульсному струмі з амплітудою 3000 А	12	8-9	8-9
Супроводжувальний струм при номінальній напрузі, А, не більше	25	250	150
Імпульс струму, при якому розрядник витримує 20 спрацьовувань:			
форма	3/8	3/8	3/8
амплітуда, А	300	3000	1500
Час гасіння дуги супроводжувального струму, мс	4-5	15-20	14-35
Диски нелінійного опору:			
матеріал	Віліт	Тервіт	Тервіт
коефіцієнт нелінійності	0,18-0,2	0,37-0,4	0,37-0,4
діаметр, мм	130	70	70
висота, мм	60	30	30
Число послідовно ввімкнених дисків	2	4	4
Число паралельно ввімкнених колонок	1	6	3
Число іскрових проміжків	2	1	1
Струм провідності через розрядник, мкА, при напрузі 4 кВ	70-130	5	5
Габаритні розміри, мм			
висота	350	226	400
ширина	294	-	524
довжина	294	-	524
діаметр	-	330	-
Маса, кг	22,5	20	74

Примітка 1. Розрядник типу РВПК-3,3 негерметизованого виконання розрахований на встановлення в опалювальному приміщенні.

Примітка 2. Розрядник РМВУ-3,3 витримує також імпульс струму 20/40 мкс при амплітуді 20 кА

Обмеження комутаційних перенапруг на тягових підстанціях постійного струму здійснюється за допомогою шунтування згладжуючого реактора спеціальним розрядним пристроєм (рис. 11.3). Він включає в свій склад резистор і перемикаючий елемент ПЕ, який замикає коло реактора при збільшенні напруги. Використання такого пристрою знижує перенапруги, в 3-5 разів зменшує енергію, що виділяється в дугогасильних камерах вимикачів, в 2-3 рази зменшує час відмикання кола короткого замикання і, завдяки меншому зносу дугогасильних камер, збільшує строк роботи вимикачів і знижує імовірність перепалу контактної мережі.

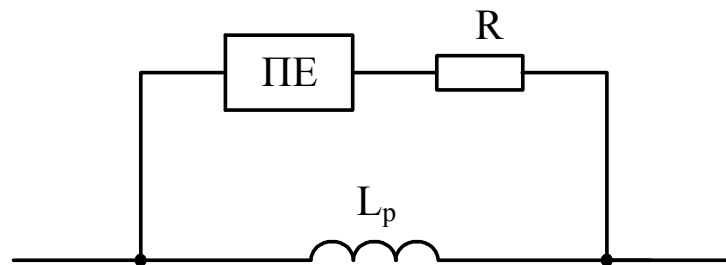


Рис. 11.3. Схема шунтування згладжуючого реактора

Слід зауважити, що в цілому захист тягових підстанцій змінного струму від атмосферних перенапруг здійснюється так само, як і загальнопромислових підстанцій. Для обмеження комутаційних перенапруг на тягових підстанціях змінного струму використовують розрядники РВ-25, які також захищають обладнання підстанції від перенапруг з боку контактної мережі.

### 11.3. Захист від перенапруг контактної мережі

В окремих випадках для захисту найбільш відповідальних ділянок контактної мережі, а також ділянок, що частіше всього уражаються ПУБ, використовуються стержневі або тросові блискавковідводи. Однак такий спосіб захисту контактної мережі від ПУБ досить дорогий.

Тому актуальним завданням є розгляд заходів, що усувають можливість пошкодження пристроїв електричної тяги при ПУБ в контактну мережу.

Для вирішення цього завдання насамперед потрібно визначити величину найбільшої можливої напруги в контактній мережі при ПУБ. Величина такої напруги може бути знайдена із співвідношення

$$U_{\max} = \frac{Z_0 \cdot Z_1}{2Z_0 + Z_1} I_6, \quad (11.1)$$

де  $Z_0$  – хвильовий опір каналу блискавки, який дорівнює 300 Ом;

$Z_1$  – хвильовий опір контактної мережі, який дорівнює для трипроводової підвіски 225 Ом та для двопроводової підвіски 300 Ом;

$I_6$  – амплітудне значення струму блискавки.

Підставивши в рівняння (11.1) наведені значення  $Z_0$  і  $Z_1$  для трипроводової підвіски, отримаємо

$$U_{\max} \approx 82I_6. \quad (11.2)$$

Якщо прийmemo  $I_6 = 50$  кА, то найбільша напруга в контактній мережі може бути значною ( $\approx 4100$  кВ). При такій напрузі відбуваються, як правило, перекриття ізоляторів. Оскільки час дії перенапруги малий (мікросекунди), то для них ця подія не являє серйозної небезпеки. Більш суттєвим є те, що після перекриття можливе тривале горіння електричної дуги супровідного струму. Під час горіння дуги можливе пошкодження глазури, руйнування фарфору ізолятора, перепал проводів, розташованих поблизу. Крім того, можливе відмикання ураженої ділянки. Якщо релейний захист працює надійно, то вказаних пошкоджень не відбувається і живлення контактної мережі відновлюється.

Тому доцільно застосовувати АПВ живильних ліній, що дозволяє швидко відновлювати нормальне живлення контактної мережі.

Таким чином, основним засобом, який охороняє контактну мережу при ПУБ, є надійний швидкодіючий захист від струмів к.з. в сполученні з АПВ.

У випадках, коли треба запобігти тривалому проходженню через місце перекриття супровідного струму к.з., тобто зменшити

величину перенапруг, а також коли не забезпечений надійний швидкодіючий захист від струмів к.з. в контактній мережі постійного і змінного струмів через 1-2 км встановлюють рогові розрядники. Вони обмежують розповсюдження хвиль атмосферних перенапруг вздовж контактної мережі і, крім того, запобігають горінню дуги на поверхні ізоляторів.

Основним елементом рогового розрядника є іскровий проміжок. Конструкція рогового розрядника показана на рис. 11.4.

При набіганні хвилі атмосферної перенапруги пробиваються іскрові проміжки, контактна мережа з'єднується з рейкою і відбувається стікання зарядів у землю. Слідом за імпульсним струмом через іскровий проміжок потече робочою напругою. Він

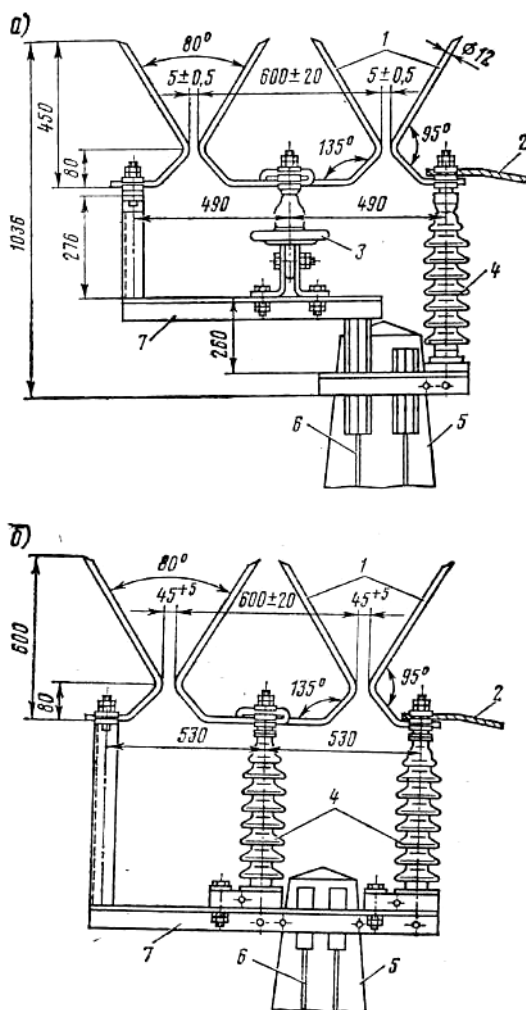


Рис. 11.4. Роговий розрядник для контактної мережі постійного і змінного струму:

- 1 – електроди; 2 – струмопровідний трос; 3, 4 – ізолятори; 5 – опора; 6 – заземлюючий трос; 7 – кронштейн супровідний струм, обумовлений

приводить до появи електричної дуги, яка за рахунок форми електродів розрядника розтягується, підіймається і гаситься. Суттєвий вплив на розтягування дуги чинить кут між електродами.

Оптимальне значення цього кута складає  $60^\circ$ . Крім того, дуга гасне швидше, якщо вітер спрямований перпендикулярно площині розрядника. Дуга в розряднику шунтує дугу на ізоляторах, тому остання гасне, а слідом гасне дуга і на розряднику. Тобто ізолятори в цих випадках охороняються від пошкоджень дугою.

Заземлення розрядника виконується як подвійний спуск сталевого прутка діаметром не менше 12 мм (для постійного струму) і 10 мм (для змінного струму). Цей спуск приєднують до індивідуального контуру заземлення з опором не більше 3 Ом для постійного струму і 10 Ом для змінного струму.

Рогові розрядники, що широко застосовуються на контактній мережі, виконуються з одним іскровим проміжком або з двома. Діючі нормативні документи вимагають застосування рогових розрядників з двома проміжками. Параметри рогових розрядників наведені в табл. 11.2 (за даними роботи [21]).

Таблиця 11.2

Параметри рогових розрядників

Параметр	З одним іскровим проміжком	З двома іскровими проміжками	
		3.3	25
Напруга контактної мережі, кВ	3.3	3.3	25
Відстань, мм	10-11	4,5-5,5	40-50
Амплітуда пробивної напруги 50 Гц, кВ ампл.	33	33	95
Імпульсна пробивна напруга, кВ	35	25	190
Найбільший струм, при якому дуга може загаснути самостійно, кА	3	7	-
Час гасіння дуги, с	0,25-0,6	0,2-0,6	-

Оскільки рогові розрядники мають всі недоліки іскрових проміжків, вони застосовуються як додатковий засіб захисту ізоляції від атмосферних перенапруг.

На контактних мережах постійного струму рогові розрядники встановлюють [3]:

- біля анкеровок проводів контактної мережі;
- біля місць приєднання пунктів паралельного з'єднання;
- на живильних лініях біля місць приєднання до контактної мережі або до пунктів групування перемикачів.

На контактних мережах змінного струму рогові розрядники встановлюють:

- з обох боків ізолюючих спряжень;
- біля місць приєднання пунктів паралельного з'єднання;
- біля відсмоктуючих трансформаторів у колі обох виводів первинної обмотки, що приєднана до контактної мережі;
- на кінцях консольних ділянок мережі, що складається з двох і більше анкерних ділянок;
- біля місць приєднання живильних ліній до контактної мережі;
- на лініях ДПР в місцях їх перетину з контактною підвіскою і в місцях секціонування (з обох боків);
- біля анкеровок проводів контактної мережі в районах з інтенсивною грозовою діяльністю.

Раніше в контактній мережі змінного струму використовувалися трубчаті розрядники ТР-35, які зараз замінюють роговими розрядниками з двома іскровими проміжками. Крім того, все більше використовують ОПН.

Для підвищення грозостійкості контактних мереж також збільшують кількість ізоляторів у підвісі. Такий засіб хоч і збільшує вартість мережі, але при цьому значно підвищується безперебійність електропостачання.

#### **11.4. Захист від перенапруг ізоляції обладнання електрорухомого складу**

Для забезпечення безвідмовної роботи електричного обладнання електрорухомого складу (ЕРС) застосовують різні захисні пристрої і схеми.

Вентильні розрядники змінного струму застосовуються в пристроях електричної тяги для захисту від атмосферних і комутаційних перенапруг ізоляції обладнання електрорухомого складу і тягових підстанцій.

Для захисту ізоляції обладнання електрорухомого складу використовують вентильні розрядники РВЭ-25М і розрядники РВМК.

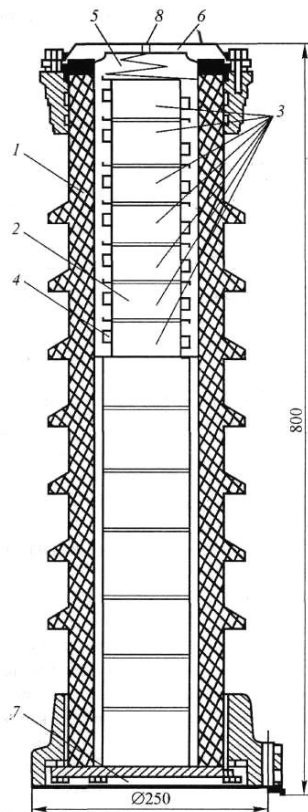


Рис. 11.5. Конструкція вентильного розрядника РВЭ-25М

Розрядник РВЭ-25М (рис. 11.5) складається з фарфорового корпусу 1, в якому розміщені 28 одиничних іскрових проміжків 2, згрупованих у сім груп 3. Кожна група проміжків шунтована високоомними нелінійними резисторами 4. Послідовно з іскровими проміжками ввімкнені вілітові диски, які стиснуті пружиною 5. Розрядник має верхню і нижню кришки 7 з герметизуючими гумовими прокладками. Отвір 8 призначений для перевірки герметичності розрядника після його збирання.

Одиничний іскровий проміжок складається з двох тарілчатих латунних електродів з зазором між ними 0.5-1.0 мм.

Схема захисту від перенапруг ізоляції обладнання ЕРС постійного струму показана на рис. 11.6. Тут дросель сприяє зниженню радіозавад, які виникають при роботі обладнання ЕРС. Конденсатор збільшує період коливаний напруги в контурі LC і знижує перенапруги на міжвітковій ізоляції. Вентильний розрядник FV1 (РВМУ-3,3) захищає ізоляцію дахового обладнання від атмосферних перенапруг, розрядник FV2 (РВПКН-3,3) розрахований на обмеження комутаційних перенапруг.



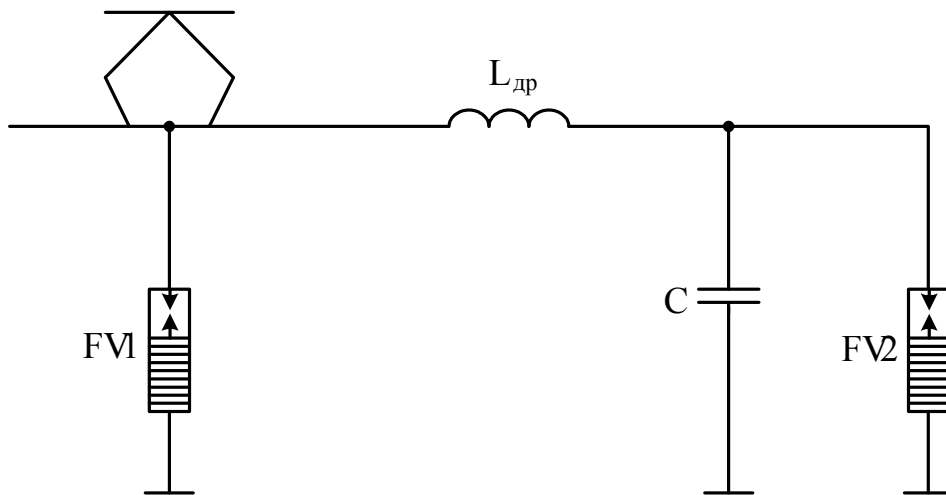


Рис. 11.6. Схема захисту від перенапруг ізоляції обладнання електропоїзда постійного струму

Захист ізоляції обладнання ЕРС змінного струму може бути здійснений різними способами. Типова схема такого захисту наведена на рис. 11.7.

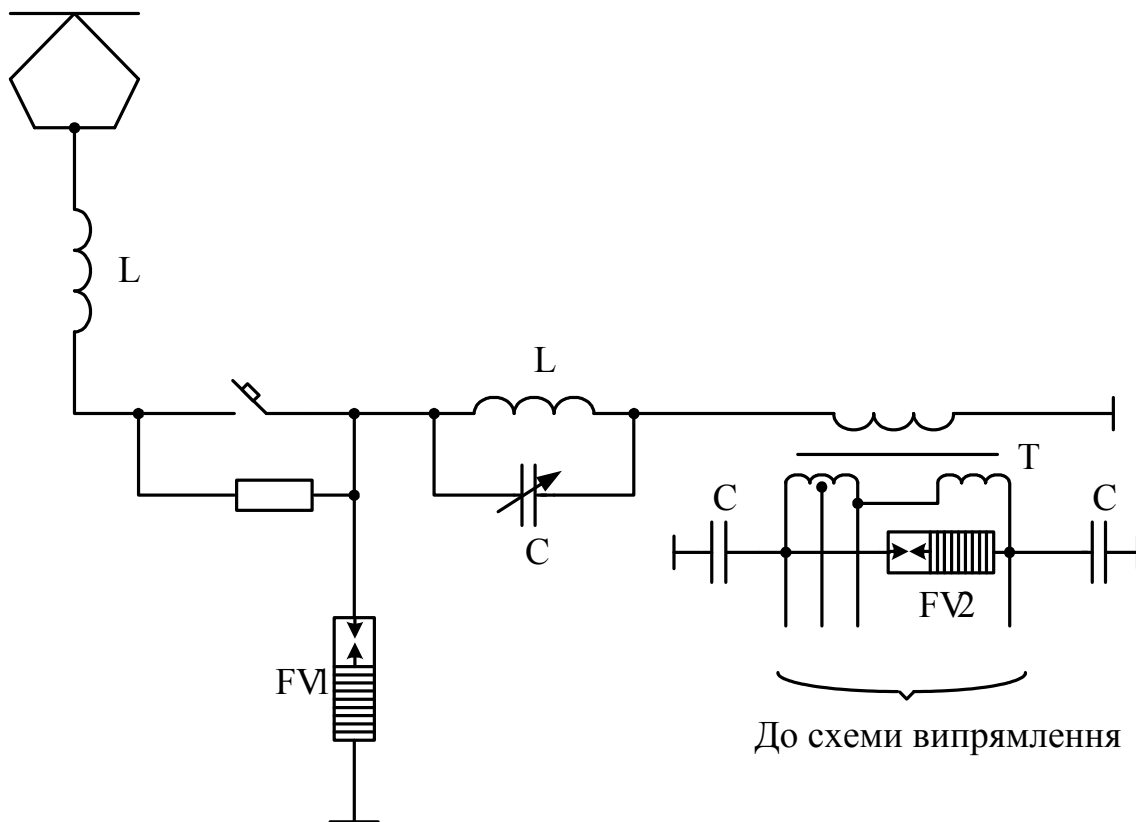


Рис. 11.7. Типова схема захисту ізоляції обладнання ЕРС змінного струму від перенапруг

Вентильний розрядник FV1 на первинному боці трансформатора обмежує атмосферні перенапруги при розімкнених контактах вимикача і комутаційні перенапруги при його роботі. Як правило, для захисту ізоляції первинної обмотки трансформатора використовують розрядник типу РВЭ-25М.

Застосування заземлюючих конденсаторів сприяє зниженню ємнісної складової перенапруги.

Введення між первинною і вторинною обмотками трансформатора заземленого металевого екрана дозволяє виключити перенапруги, обумовлені ємнісним зв'язком між обмотками трансформатора. Такий захист від перенапруг простий і найбільш ефективний під час регулювання напруги. Однак це ускладнює конструкцію трансформатора.

Вентильний розрядник FV2 у вторинному колі трансформатора забезпечує більш чіткий поріг обмеження перенапруг.

### **Контрольні питання**

1. Що називають координацією ізоляції?
2. Що таке рівень ізоляції обладнання?
3. Що таке мінімальний рівень ізоляції обладнання?
4. Чим визначається ефективність дії захисного пристрою?
5. Назвіть організаційно-технічні заходи, що забезпечують підтримання ізоляції обладнання в нормальному стані.
6. Чим відрізняється дія грозових перенапруг від дії внутрішніх перенапруг?
7. Як здійснюється захист обладнання тягових підстанцій від ПУБ?
8. Які заходи передбачають для виключення заносу високих потенціалів на електрообладнання підстанцій?
9. Як здійснюють захист від хвиль перенапруг, що набігають на підстанцію?

10. Яка основна відмінність розрядників постійного струму від розрядників змінного струму?
11. За допомогою чого здійснюється обмеження комутаційних перенапруг на тягових підстанціях постійного струму?
12. Як в цілому здійснюється захист тягових підстанцій змінного струму від атмосферних перенапруг?
13. Які негативні дії викликають перенапруги в контактній мережі?
14. Який основний засіб захисту контактної мережі від ПУБ?
15. Які додаткові засоби захисту контактної мережі від атмосферних перенапруг?
16. Які захисні пристрої застосовують для захисту ізоляції обладнання ЕРС?
17. Прокоментуйте схему захисту від перенапруг ізоляції обладнання ЕРС постійного струму.
18. Прокоментуйте типову схему захисту від перенапруг ізоляції обладнання ЕРС змінного струму.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. – К., 2006.
3. Правила улаштування системи тягового електропостачання залізниць України. – К., 1998.
4. ДНАОП 0.00-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – К., 1998.
5. ДНАОП 1.1.10-1.07-01. Правила эксплуатации электрозащитных средств. – К., 2001.
6. ДНАОП 5.1.11-1.48-00. Правила безпеки для працівників залізничного транспорту на електрифікованих лініях. – К., 2000.
7. Інструкція з технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій, пунктів живлення і секціонування електрифікованих залізниць. – К., 2008.
8. Инструкция по заземлению устройств электроснабжения на электрифицированных железных дорогах. – М.: Транспорт, 1985.
9. Электрические сети и станции / Под ред. Л.Н. Баптиданова. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963.
10. Электроснабжение: Учебник / Под ред. В.И. Шапошникова и Б.Т. Кононова. – М.: МО СССР, 1987. – Ч.1.
11. Техника высоких напряжений / Под общ. ред. Л.И. Сиротинского. – М.-Л.: ГЭИ, 1951. – Ч.1.
12. Техника высоких напряжений / Под ред. М.А. Бабилова. – М.: ГЭИ, 1963.
13. Иерусалимов М.Е., Орлов Н.Н. Техника высоких напряжений. – К.: Изд-во Киевского университета, 1967.
14. Стефанов К.С. Техника высоких напряжений. – Л.: Энергия, 1967.
15. Долгинов А.И. Техника высоких напряжений в электроэнергетике. – М.: Энергия, 1968.

16. Техника высоких напряжений / Под ред. Д.В. Разевига. – М.: Энергия, 1976.
17. Техника высоких напряжений / Под ред. М.В. Костенко. – М.: Высшая школа, 1973.
18. Тиняков Н.А., Степанчук К.Ф. Техника высоких напряжений. – Минск: Высшая школа, 1971.
19. Перколаб Ю.В., Подчуфаров И.С. Техника высоких напряжений. – Харьков: ХВВКУ, 1974.
20. Объем и нормы испытания электрооборудования. – М.: Энергия, 1975.
21. Радченко В.Д. Техника высоких напряжений устройств электрической тяги. – М.: Транспорт, 1975.
22. Базуткин В.В. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах / Под общ. ред. В.П. Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
23. Акімов О.І. Російсько-український словник основних термінів з електротехніки та електропостачання. – Харків: ХВУ, 1999.
24. Акімов О.І. Ізоляція електроустановок високої напруги та захист від перенапруг. Методичні вказівки до виконання контрольної роботи з дисципліни «Електротехнічні матеріали та техніка високих напруг». – Харків: УкрДАЗТ, 2005.
25. Егоров В.В. Техника высоких напряжений. Перенапряжения в устройствах электрической тяги. Профилактические испытания изоляции. – М.: Маршрут, 2004.
26. Почаевец В.С. Электрические подстанции. – М.: Желдориздат, 2001.
27. Михеев В.П. Контактные сети и линии электропередачи. – М.: Маршрут, 2003.
28. Южаков Б.Г. Технология и организация обслуживания и ремонта устройств электроснабжения. – М.: Маршрут, 2004.
29. Техніка і електрофізика високих напруг: Навч. посібник / За ред. В.О. Бржезицького та В.М. Михайлова. – Харків: НТУ «ХПІ» – Торнадо, 2005.
30. Акімов О.І. Методичний посібник з курсового та дипломного проектування систем зовнішнього електропостачання електрифікованих залізниць. – Харків: УкрДАЗТ, 2007.



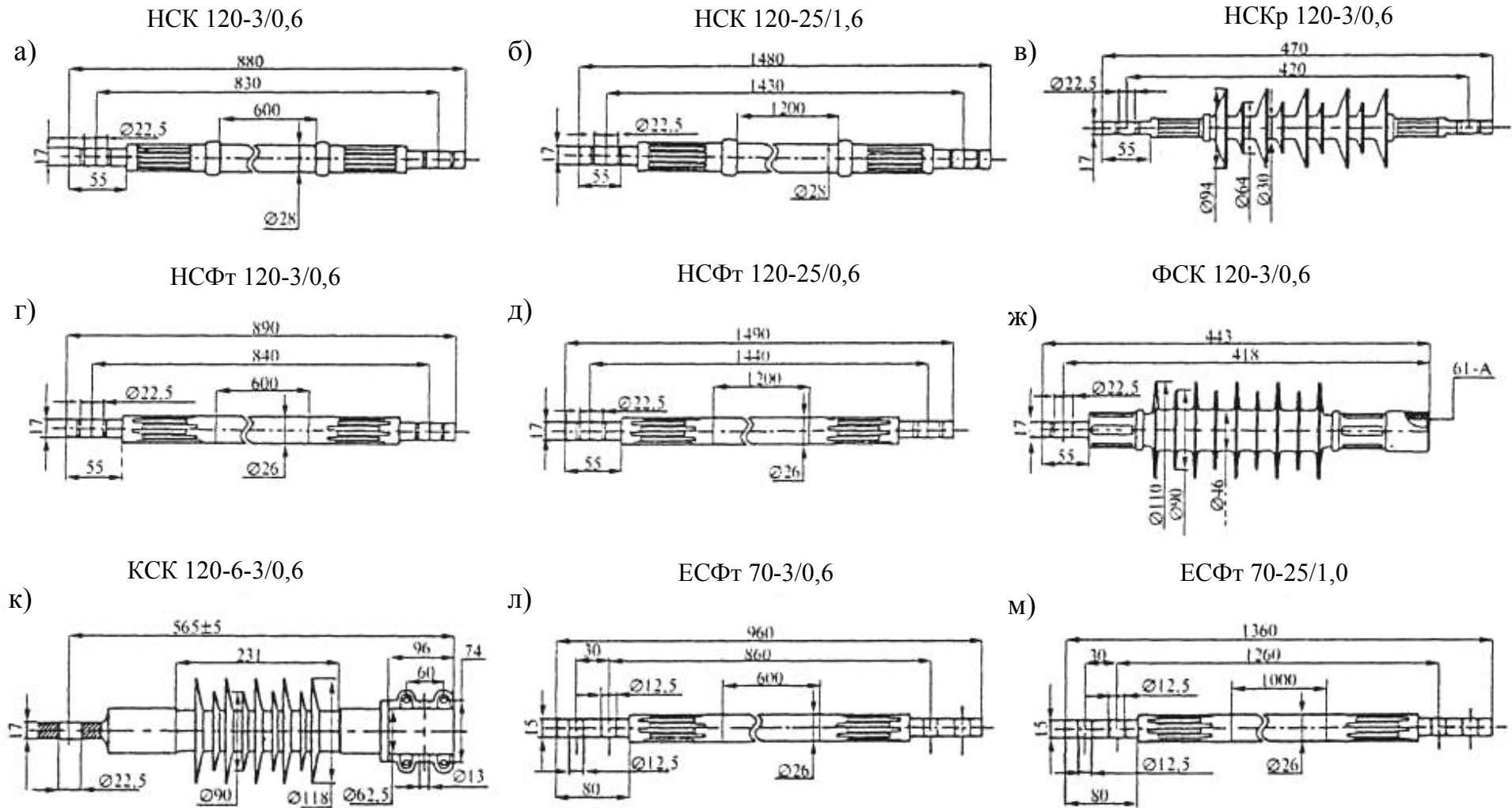


Рис. 3.6. Полімерні ізолятори: натяжні гладкостержневі з кремнійорганічними на 3(а) і 25 кВ (б), ребристими на 3 кВ (в) і фторопластовими на 3 (г) і 25 кВ (д) оболонками; фіксаторні (ж), консольні (к), натяжні елементи для 3 (л) і 25 кВ (м)