

Міністерство освіти та науки України
Сумський державний університет

М. В. Петровський

ТЕХНІКА ВИСОКИХ НАПРУГ

Конспект лекцій

Суми
Сумський державний університет
2015

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1. ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В ДІЕЛЕКТРИКАХ (Частина 1).....	6
1.1 Загальні відомості.....	6
1.2 Конфігурація електричних полів	7
1.3 Види струмів в ізоляції та вольтамперна характеристика газового проміжку	10
1.4 Іонізаційні процеси в газі.....	11
1.5 Види іонізації	14
2. ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В ДІЕЛЕКТРИКАХ (Частина 2).....	20
2.1 Лавина електронів.....	20
2.2 Умова самостійності розряду	22
2.3 Утворення стрімера	24
2.4 Закон Пашена	25
2.5 Розряд у неоднорідних полях	31
3. ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В ДІЕЛЕКТРИКАХ (Частина 3).....	33
3.1 Ефект полярності	33
3.2 Бар'єрний ефект.....	36
3.3 Вплив часу прикладання напруги на електричну міцність газової ізоляції. Вольт-секундна характеристика (ВСХ).....	39
3.4 Розрахунок напруги пробною між двома металевими сферами.....	43
4. КОРОННИЙ РОЗРЯД.....	50
4.1 Коронний розряд і його характеристики.....	50
5. ЕЛЕКТРИЧНІ РОЗРЯДИ В РІДКИХ ДІЕЛЕКТРИКАХ.....	63
5.1 Вплив вологи та мікродомішок	66
5.2. Вплив тиску	68
5.3. Вплив температури	69
5.4. Вплив часу дії напруги.....	70
5.5 Вплив геометрії електродів, відстані між ними, матеріалу та полярності на пробивну напругу	72
5.6 Бар'єрний ефект.....	73
6. ЕЛЕКТРИЧНІ РОЗРЯДИ У ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКАХ.....	75
6.1 Пробій твердої ізоляції.....	75
6.2 Перекриття ізоляції.....	80
7. ІЗОЛЯТОРИ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ І ПІДСТАНЦІЙ	85
7.1 Основні характеристики ізоляторів	85
7.2 Лінійні ізолятори.....	87
7.3 Розподіл напруги уздовж гірлянди ізоляторів.....	90
7.4 Наближений розрахунок вологорозрядної напруги ізолятора зовнішньої установки	92
8. ВНУТРІШНЯ ІЗОЛЯЦІЯ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК	104
8.1. Ізоляція силових трансформаторів	104
8.2. Ізоляція введів високої напруги	107

8.3. Ізоляція силових конденсаторів	109
8.4. Ізоляція силових кабелів	112
8.5. Ізоляція електричних машин високої напруги	114
Резюме.....	115
Контрольні питання.....	116
9. ВИПРОБУВАННЯ ІЗОЛЯЦІЇ	117
9.1. Дефекти ізоляції та механізми їх виникнення	117
9.2. Основні види профілактичних випробувань ізоляції.....	121
Резюме.....	123
Контрольні питання.....	123
10. ВИМІР ОПОРУ І ЄМНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ	124
10.1. Контроль опору ізоляції.....	124
10.2. Контроль ємності ізоляції.....	128
10.3. Хроматографічний аналіз масла.....	130
Резюме.....	131
Контрольні питання.....	131
11. КОНТРОЛЬ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ВТРАТ І ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ.....	133
11.1. Контроль діелектричних втрат в ізоляції	133
11.2. Контроль часткових розрядів	136
Резюме.....	138
Контрольні питання.....	138
12. КОНТРОЛЬ ПІДВИЩЕНОЮ НАПРУГОЮ. ВИПРОБУВАННЯ ІЗОЛЯЦІЇ ОКРЕМИХ ВИДІВ ОБЛАДНАННЯ	139
12.1. Випробування ізоляції підвищеною напругою.....	139
12.2. Випробування ізоляції кабелів, трансформаторів і високовольтних вводів.....	142
Резюме.....	144
Контрольні питання.....	145
13. ВИПРОБУВАЛЬНІ УСТАНОВКИ ВИСОКОЇ ЗМІННОЇ ТА ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ	146
13.1. Випробувальні установки високої змінної напруги.....	146
13.2. Випробувальні установки високої постійної напруги	149
Резюме.....	151
Контрольні питання.....	152
14. ГЕНЕРАТОРИ ІМПУЛЬСНИХ НАПРУГ	153
14.1. Генератори комутаційних імпульсів.....	153
14.2. Генератори імпульсних напруг	154
Резюме.....	159
Контрольні питання.....	159
15. ВИМІРЮВАННЯ ВИСОКИХ НАПРУГ	160
15.1 Вимірювання високих постійних напруг	160
15.2. Вимірювання високих змінних напруг.....	162
15.3. Вимірювання високих імпульсних напруг.....	166

ВСТУП

Техніка високих напруг (ТВН) виникла у зв'язку з необхідністю електропередачі великих електричних потужностей на далекі відстані. В 1880 році професор Петербурзького лісового інституту Д. А. Лачинов розробив і виклав теорію передачі електроенергії на великі відстані – підвищення напруги і зменшення струму в міру збільшення дальності та переданої потужності.

Відповідно запитам енергетики розвивалася техніка високих напруг. Потребувалось створення промислових високовольтних установок змінної, постійної та імпульсної напруг, а також установок для здійснення досліджень і випробувань ізоляції при впливі різних видів високої напруги. Підвищення рівня напруг вимагало вивчення фізичних явищ, механізмів впливу електромагнітних полів високої напруги на ізоляцію в різних умовах експлуатації.

У цей час номінальна напруга ЛЕП досягає 1150 кВ, а передана потужність по одному ланцюгу такої лінії становить 6 ГВт. Надзвичайно велике значення при цьому здобувають питання створення й експлуатації комплексу обладнання, необхідного для генерування, передачі, перетворення й розподіли електричної енергії: генераторів, трансформаторів, повітряних і кабельних ліній, конденсаторів і ін. апаратів.

Високі напруги широко використовуються в електротехнологіях: фарбування, електрофільтри, очищення води, електрогідравлічні й електроімпульсні технології (буріння, дроблення, різання гірських порід і ін.); в електрофізичних установках – керований термоядерний синтез, прискорювачі, лазери й ін.

Курс лекцій складається з 4 великих розділів:

1. Електрофізичні процеси в діелектриках.
2. Високовольтні ізоляційні конструкції.
3. Вимірювання і контроль параметрів ізоляції
4. Високовольтні іспитові установки.

Оскільки основною причиною виходу з ладу високовольного обладнання є відмови ізоляції, то найбільші зусилля спрямовуються на збереження її в цілісності. І тут особливу роль відіграє знання закономірностей зародження й розвитку розрядів у діелектриках (в ізоляції).

У високовольному обладнанні використовуються газоподібні, рідкі, тверді ізоляційні матеріали і їхні комбінації. Ізоляція підрозділяється на зовнішню (повітря і все, що знаходиться в повітрі) і внутрішню (ця ізоляція відділена від навколишнього середовища корпусами і може бути газоподібною, рідкою, твердою, комбінованою).

1. ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В ДІЕЛЕКТРИКАХ (Частина 1)

Повітря дотепер залишається основним видом зовнішньої ізоляції ліній електропередачі, енергетичного обладнання і високовольтної техніки. Традиційний шлях створення ізоляційних конструкцій, що включає їх повномасштабні натурні випробування ще на пошуковому етапі роботи, зі збільшенням номінальних напруг стають усе менш перспективним. Техніка випробувань стає трудомісткою й вимагає усе більше часових і матеріальних витрат. У зв'язку із цим виникає потреба в чисельних оцінках електричної міцності повітряних проміжків на основі розрахункових моделей, що достовірно відображають закономірності розвитку розряду в повітрі.

1.1 Загальні відомості

Електричним пробоем ізоляції називають явище втрати ізоляцією ізоляційних властивостей при перевищенні напругою на ізоляції критичного значення. Це значення напруги називають *пробивною напругою ізоляції* U_{np} .

Електричним пробоем діелектрика називається явище втрати діелектриком ізоляційних властивостей при перевищенні напруженістю електричного поля критичного значення.

Електричною міцністю діелектрика E_{np} називають середнє значення напруженості електричного поля в міжелектродному проміжку безпосередньо перед пробоем, оскільки найпростіше вимірювати та оцінювати саме цю величину:

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{S}, \quad (1.1)$$

де S – відстань між електродами.

Атоми та молекули діелектрика характеризуються дуже сильним зв'язком між собою заряджених частинок, так що у звичайному стані всі заряджені частинки зв'язані, взаємно компенсують одна одну і переміщення заряджених частинок на відстані, порівнянні з відстанню між електродами, не відбувається. При пробі відбувається звільнення заряджених частинок, які спрямовано переміщуються під дією сил електричного поля, створюючи електричний струм.

Електрична міцність газового проміжку залежить як від відстані між електродами, так і – рівній мірі – від тиску й температури газу. Дуже сильно на електричну міцність ізоляційного проміжку – і не тільки газового проміжку – впливає форма електродів. Крім того, електрична міцність складним чином залежить від швидкості наростання напруги, визначаючи можливості пробі ізоляційного проміжку від тривалості прикладеної напруги.

1.2 Конфігурація електричних полів

Діелектрики служать для ізоляції струмоведучих електродів різної полярності один від одного. Електроди, що ізолюються (шини розподільних пристроїв, провід ліній електропередач, зовнішні струмоведучі частини електричних апаратів і т.п.) створюють електричні поля різної конфігурації.

За ступенем однорідності електричного поля, що залежить від форми електродів, розрізняють два види ізоляційних проміжків:

- ізоляційні проміжки з *однорідним* і *слабонеоднорідним* електричним полем (СНП);
- ізоляційні проміжки з *різконеоднорідним* електричним полем (РНП).

Ступінь неоднорідності електричного поля між електродами характеризується коефіцієнтом неоднорідності K_H , що дорівнює відношенню максимальної напруженості електричного поля $E_{\max}$ до середньої напруженості E_{cp} між електродами, тобто

$$K_H = \frac{E_{\max}}{E_{cp}} \quad (1.2)$$

Середня напруженість є відношення напруги U , прикладеної до електродів, до відстані S між електродами:

$$E_{cp} = \frac{U}{S} \quad (1.3)$$

Максимальна напруженість залежить від прикладеної до електродів напруги, конфігурації, розмірів електродів і відстані між ними.

Наприклад, для коаксіальних циліндрів (кабель) (рис. 1.1) максимальна напруженість визначається як

$$E_{\max} = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r}} \quad (1.4)$$

а середня напруженість

$$E_{cp} = \frac{U}{R - r} \quad (1.5)$$

де U – прикладена напруга, кВ;

r – зовнішній радіус внутрішнього циліндра (жила кабелю), см;

R – внутрішній радіус зовнішнього циліндра (оплітка кабелю), см.

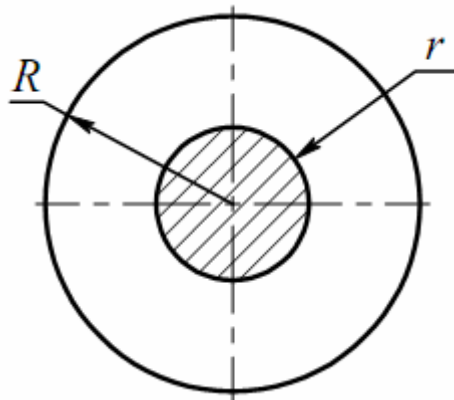


Рис. 1.1. Схема коаксіальних електродів

Підставивши (1.4) та (1.5) в (1.2), отримаємо

$$K_H = \frac{R-r}{r \ln \frac{R}{r}}, \quad (1.6)$$

тобто K_H залежить від геометричних розмірів електродів.

Для однорідного поля коефіцієнт неоднорідності $K_H = 1$.

До проміжків із СНП належать проміжки, у яких $K_H \leq 2$. Типовим прикладом проміжку із СНП є поле між електродами типу *площина – площина* із закругленими кряями (електродами Роговського) або проміжки з електродами типу *куля – куля* (рис. 1.2) при відстані S між електродами менше діаметра D кулі ($S < D$).

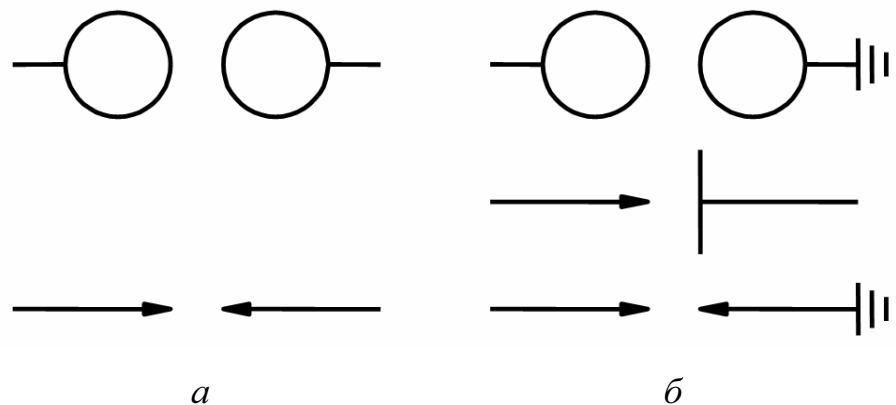


Рис. 1.2. Форми електричних полів:

a – симетрична система електродів;

б – несиметрична система електродів

До проміжків із РНП відносять проміжки, що мають $K_H > 3$. Найбільш різко вираженими ізоляційними проміжками цього типу є проміжки з електродами *стрижень – площина* або *стрижень – стрижень* (рис. 1.2).

Крім цього, розрізняють симетричну й несиметричну систему електродів. Симетрична форма – електроди мають однакову форму й розміри й відсутнє

заземлення якого-небудь із них (рис. 1.2а). Несиметрична форма – електроди мають конфігурацію, що відрізняється, розміри або один з них заземлений (рис. 1.2б). Пробивні напруги в несиметричній системі електродів нижче, ніж у симетричній.

1.3 Види струмів в ізоляції та вольтамперна характеристика газового проміжку

Ізоляція електроустановки служить для запобігання протікання електричного струму між ізольованими частинами. У нормальному стані через ізоляцію можуть протікати *три види струмів*:

- ємнісні струми при змінній напрузі, які залежать від ємності ізоляції й можуть бути великими за величиною; здатність ізоляції проводити ємнісні струми характеризується величиною ємності ізоляції;
- абсорбційні струми (струми різних видів уповільненої поляризації), що позначаються і при постійній, і при змінній напругах; характеристикою ізоляції відносно абсорбційних струмів є кут діелектричних втрат і коефіцієнт абсорбції, що розглянутий у темі 10;
- наскрізні струми, надзвичайно малі за величиною, які протікають при постійній напрузі через тривалий час після її вмикання; здатність ізоляції проводити наскрізні струми характеризується величиною опору ізоляції.

Заряджені частинки, що входять до складу молекул і кристалічних решіток діелектрика, досить міцно зв'язані в речовині та при умовах, близьких до нормальних, не можуть переміщатися на помітні відстані. Наскрізні струми обумовлені невеликою кількістю вільних заряджених частинок, що утворюються за рахунок зовнішніх іонізаторів, і ці вільні заряджені частинки здатні переміщатися через ізоляцію від одного електрода до іншого.

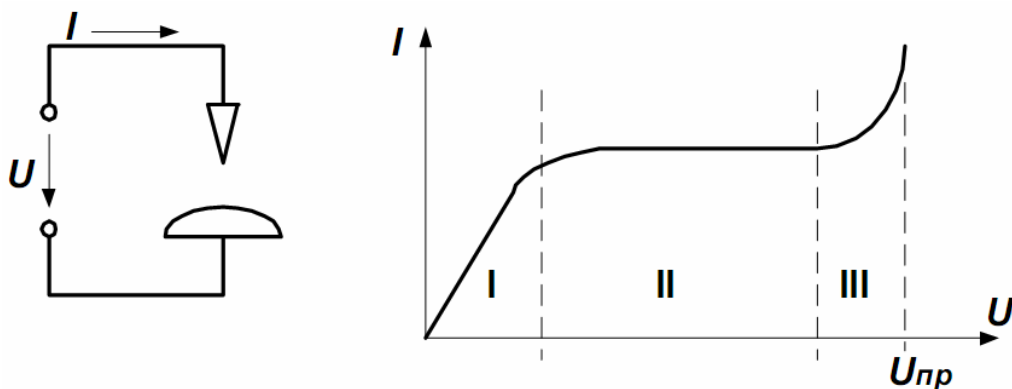


Рис. 1.3. Вольтамперна характеристика газового проміжку

У газових ізоляційних проміжках при невеликих напругах виконується закон Ома (рис. 1.3, область I); при підвищенні напруги настає насичення, при якому всі заряджені частинки, що генеруються зовнішніми іонізаторами досягають електродів і зростання струму при збільшенні напруги не відбувається (область II), щільність струму при цьому становить приблизно 10^{-15} А/м^2 при напруженості поля близько 0.6 В/м . Тільки при більших напругах, коли виникає іонізація за рахунок великої напруженості електричного поля, починається різке зростання електричного струму (область III), що призводить до незалежності розряду від зовнішніх іонізаторів, тобто до його самостійності.

1.4 Іонізаційні процеси в газі

Під час відсутності зовнішнього електричного поля частинки газу знаходяться у стані хаотичного (теплого) руху, постійно стикаючись із іншими частинками. Якщо на одиниці довжини шляху частинка зазнала Z зіткнень, то середня довжина її вільного пробігу λ дорівнює

$$\lambda = \frac{1}{Z}. \quad (1.7)$$

Значення λ залежить від концентрації частинок $N = p/kT$ ($k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постійна Больцмана) і, отже, від тиску й температури газу. Зі збільшенням тиску та зменшенням температури λ зменшується. Частинки газу при тепловому русі переміщуються безладно. Наявність зовнішнього електричного поля призводить до виникнення направленого руху заряджених частинок, якщо такі є, тобто до появи в газі електричного струму.

Середня швидкість v дрейфу частинок пропорційна напруженості електричного поля. Коефіцієнт пропорційності $K = v/E$ називається рухливістю і являє собою швидкість дрейфу частинки в електричному полі з напруженістю $E = 1 \text{ В/см}$. Рухливість частинки в електричному полі залежить від її маси: чим більше маса частинки, тим менше її рухливість. За експериментальними даними при нормальних атмосферних умовах ($p = 101.3 \text{ кПа} = 760 \text{ мм рт. ст.}$, $T = 293 \text{ °К}$) рухливість іонів у повітрі становить $K_{\text{іон}} = 2 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, а рухливість електронів в електричному полі з напруженістю, при якій стає можливим іонізаційний процес, $K_{\text{ел}} \approx 400 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

При розгляді процесів виникнення та зникнення заряджених частинок у газі можна вважати електрони частинками і не враховувати їхні хвильові властивості. Коли електрони перебувають на найменших стаціонарних орбітах, те потенційна енергія атома мінімальна. Такий стан атома є стійким і називається *нормальним*. Перехід одного або декількох електронів з нормальних орбіт на більш віддалені від ядра називається *збудженням атома*. Енергію, необхідну для збудження, атом (молекула) може одержати при зіткненні з іншою частинкою або при поглинанні короткохвильового випромінювання (фотозбудження). Час перебування атома в збудженому стані становить $\sim 10^{-8} \dots 10^{-10} \text{ с}$. Повернення атома в нормальний стан відбувається довільно й супроводжується випромінюванням фотона.

Коли електрон віддаляється від ядра настільки, що взаємодія його з ядром практично зникає, то електрон стає вільним. Відбувається іонізація атома, у

результаті якої утворюються дві незалежні частинки: електрон і позитивний іон. Енергія, що поглинається атомом, називається *енергією іонізації*. Енергія збудження та іонізації виражається в електронвольтах ($1\text{eV} = 1.6 \cdot 10^{-19}\text{Дж}$). Мінімальні енергії збудження, іонізації та дисоціації для деяких газів, що містяться в повітрі, наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Енергія дисоціації молекул, енергія збудження перших енергетичних рівнів і енергія іонізації газів

Молекула або атом	Енергія в eV		
	Дисоціації	Збудження	Іонізації
O ₂	5.17	7.9	12.1
N ₂	9.81	8.18	15.6
H ₂	4.51	11.5	15.44
CO ₂	7.78	10.0	13.8
H ₂ O	4.77	7.6	13.6
H		10.2	13.6
He		20.9 (19.8)	24.6
Ne		16.58 (16.53)	21.6
O		8.1	13.6
He		8.39 (8.28)	12.1
У дужках наведені метастабільні рівні збудження			

Одночасно із іонізацією атомів і молекул газу відбувається процес взаємної нейтралізації заряджених частинок – рекомбінація. Внаслідок дії двох протилежних факторів – іонізації та рекомбінації – встановлюється рівноважний стан, при якому в одиницю часу виникає та рекомбінується певна кількість заряджених частинок. Цей рівноважний стан характеризується певним ступенем іонізації газу, тобто відношенням концентрації іонізованих частинок до загальної концентрації частинок

$$K_{\text{іон}} = \frac{n_{\text{іон}}}{N_{\Sigma}}, \quad (1.8)$$

де $K_{\text{іон}}$ – коефіцієнт ступеня іонізації газу;

$n_{\text{іон}}$ – концентрація іонізованих частинок;

N_{Σ} – загальна концентрація частинок ($N_{\Sigma} \approx 10^{22}$ атомів на см^3).

Газ, у якому значна частина атомів і молекул іонізована, називається *плазмою* ($n_{\text{іон}} \geq 10^{12} - 10^{14}$ іонів на см^3).

Концентрація позитивних і негативних зарядів у плазмі приблизно однакова. Плазма – форма існування речовини при температурі приблизно 5000 К та вище.

При зіткненні електронів із нейтральним атомом або молекулою можливий захват ними електрона й утворення негативного іона. Стійкість негативних іонів, що утворилися, залежить від енергії W_c спорідненості атома до електрона, тобто від енергії, що виділяється при захопленні електрона атомом:

Речовина	F	Cl	Br	I	O	O ₂	H	H ₂ O	He	N ₂
W_c , eV	3.6	3.8	3.5	3.2	2.0	0.9	0.7	0.9	<0	<0

Якщо енергія спорідненості негативна, то утворення негативного іона неможливо. Найбільшу енергією спорідненості мають галогени: фтор, хлор, йод і з'єднання, у які входять атоми цих елементів. У кисні, а значить у повітрі та парах води, також можливе утворення негативних іонів.

Гази, у яких можливе утворення негативних іонів, називаються електронегативними (кисень, хлор, пари води й ін.), а гази, у яких негативні іони не утворюються, – електропозитивними (азот, гелій).

1.5 Види іонізації

Дуже мала концентрація вільних заряджених частинок у діелектрику призводить до дуже малих наскрізних струмів в ізоляції при невеликих напругах. При пробі концентрація вільних заряджених частинок різко підвищується. Це підвищення обумовлене виникненням іонізаційних процесів.

Розрізняють *об'ємну* та *поверхневу* іонізації. *Об'ємна іонізація* – утворення заряджених частинок в об'ємі газу між електродами. *Поверхнева іонізація* – випромінювання (емісія) заряджених частинок з поверхні електродів.

Об'ємна іонізація підрозділяється:

- 1) на ударну іонізацію;
- 2) східчасту іонізацію;
- 3) фотоіонізацію;
- 4) термоіонізацію.

Ударна іонізація – зіткнення електрона з нейтральним атомом або молекулою. Якщо до проміжку між електродами в газі прикладена напруга, то заряджені частинки, крім теплової швидкості, здобувають під дією електричного поля спрямовану швидкість

$$V = KE \quad (1.9)$$

де V – швидкість, см/с;

K – рухливість зарядженої частинки, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$;

E – напруженість зовнішнього електричного поля, В/см.

При цьому кінетична енергія частинок може бути істотно більше теплової енергії та достатня для здійснення ударної іонізації нейтральних частинок. Умова іонізації може бути записане у вигляді

$$\frac{m \cdot V^2}{2} \geq W_i, \quad (1.10)$$

де m – ефективна маса зарядженої частинки, кг ($m_{el} = 9.1 \cdot 10^{-31}$ кг – ефективна маса електрона; $m_{prot} = 1.7 \cdot 10^{-27}$ кг – ефективна маса протона);

V – швидкість руху зарядженої частинки, м/с;

W_i – енергія іонізації нейтрального атома або молекули, еВ.

Тому що швидкість електронів значно більше швидкості іонів, то ударна іонізація іонами малоефективна й визначальною є ударна іонізація електронами.

На рис. 1.4а наведена схема ударної іонізації електроном. Умовою ударної іонізації електроном є

$$\frac{m_{ел} \cdot V_1^2}{2} \geq W_i \quad (1.11)$$

де $m_{ел}$ – маса електрона;

V_1 – швидкість електрона;

W_i – енергія іонізації молекули (атома).

Східчаста іонізація відбувається тоді, коли енергія першого, що впливає на нейтральний атом або молекулу електрон призводить атом тільки в збуджений стан, тобто енергія електрона недостатня для іонізації. Вплив другого електрона на збуджений атом або молекулу приводить до іонізації. Час між впливом першого й другого електронів повинен бути не більше часу знаходження нейтрального атома або молекули в збудженому стані. На рис. 1.4б наведена схема східчастої іонізації. Умовою східчастої іонізації є

$$\frac{m_{ел} \cdot V_1^2}{2} + \frac{m_{ел} \cdot V_3^2}{2} \geq W_i \quad (1.12)$$

де $m_{ел}$ – маса електрона;

V_1, V_3 – швидкості електронів;

W_i – енергія іонізації молекули (атома).

Для здійснення *фотоіонізації* в об'ємі газу енергія фотонів, випромінювана збудженими атомами або молекулами, повинна бути більше енергії іонізації при поглинанні фотона нейтральним атомом або молекулою. Цей процес успішно здійснюється в суміші газів (повітря). При фотоіонізації можлива й східчаста іонізація.

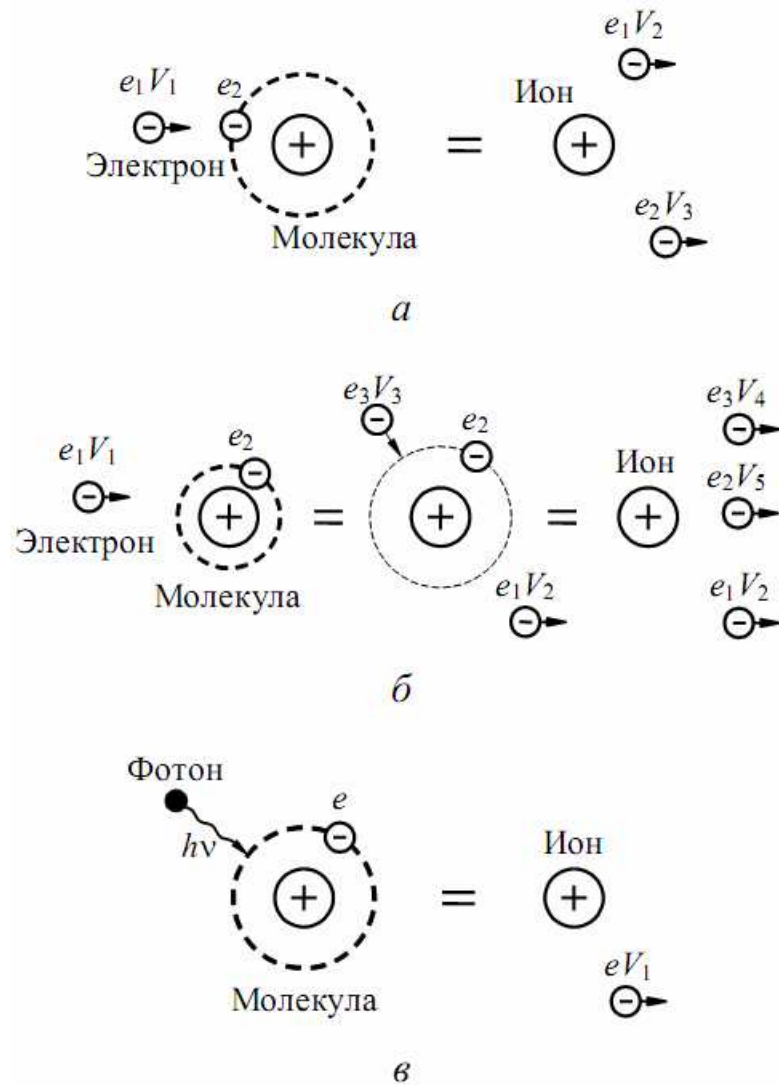


Рис. 1.4. Схеми об'ємної іонізації газу:

a – ударна іонізація; *б* – східчаста іонізація; *в* – фотоіонізація;

e – елементарний заряд електрона ($e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл)

На рис. 1.4*в* показана схема фотоіонізації.

Умовою фотоіонізації є

$$h\nu \geq W_i \quad (1.13)$$

де h – постійна Планка;

ν – власна частота фотона.

Термоіонізація обумовлена тепловим станом газу та може відбуватися в результаті наступних актів:

- 1) звільнення електрона при зіткненнях між атомами й молекулами при високих температурах;
- 2) фотоіонізації нейтральних атомів і молекул, збуджених у результаті теплової взаємодії при високих температурах;
- 3) іонізації при зіткненні електрона з нейтральним атомом або молекулою при високих температурах.

У газі при тепловому русі відбувається дисоціація молекул раніше, ніж відбудеться іонізація, тому що енергія дисоціації менше, ніж енергія іонізації. У табл. 1.1 як приклад наведені енергія дисоціації й іонізації для деяких газів.

Поверхнева іонізація (емісія електронів) здійснюється за рахунок:

- 1) бомбардування поверхні катода позитивними іонами – *вторинна електронна емісія* (схема наведена на рис. 1.5а). Умова для виходу електрона з поверхні:

$$\frac{m_{\text{іон}} \cdot V_{\text{іон}}^2}{2} \geq W_{\text{вих}} \quad (1.14)$$

де $m_{\text{іон}}$ – маса іона;

$V_{\text{іон}}$ – швидкість іона;

$W_{\text{вих}}$ – енергія виходу електрона;

- 2) *фотоемісії*, тобто променистої енергії, що опромінює катод, наприклад, ультрафіолетового світла, рентгенівського випромінювання, випромінювання збуджених атомів і молекул в об'ємі газу між електродами (схема процесу фотоемісії наведена на рис. 1.5б). При цьому умова для виходу електрона з поверхні -

$$h\nu \geq W_{\text{вих}} \quad (1.15)$$

де h – постійна Планка;

ν – частота випромінювання фотона;

$W_{\text{вих}}$ – енергія виходу електрона;

3) нагрівання поверхні катода – *термоелектронна емісія* (схема наведена на рис. 1.5в);

4) енергії зовнішнього електричного поля – *автоелектронна* або *холодна емісія* (схема наведена на рис. 1.5г) можлива при напруженості електричного поля більше $3 \cdot 10^2$ кВ/см.

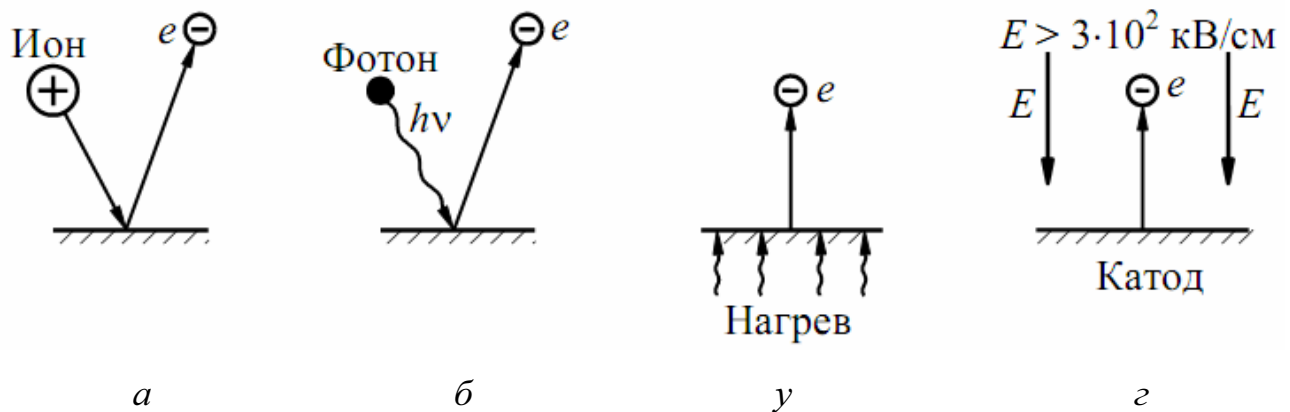


Рис. 1.5. Схеми поверхневої іонізації:

а – вторинна електронна емісія; б – фотоелектронна емісія;

в – термоелектронна емісія; г – автоелектронна емісія

Для реалізації поверхневої іонізації необхідно, щоб енергія впливу була більше енергії виходу електрона з катода ($W_{\text{вих}}$). Енергія $W_{\text{вих}}$ нижче енергії об'ємної іонізації газу приблизно в 2 рази й більше та залежить від матеріалу електрода. Для мідних і сталевих електродів у повітрі робота виходу становить $W_{\text{вих}} = 4.5$ еВ (порівняй з табл. 1.1).

2. ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В ДІЕЛЕКТРИКАХ (Частина 2)

2.1 Лавина електронів

Якщо в газі між двома електродами, що утворюють однорідне поле, з'являється вільний електрон, то, рухаючись до анода при достатній напруженості електричного поля, він може іонізувати атом або молекулу газу при зіткненні (рис. 1.4а). У результаті цього з'являється новий (ще один) електрон і позитивний іон. Цей електрон разом з початковим іонізують нові атоми й молекули, і число вільних електронів безупинно наростає. Цей процес отримав назву *лавини електронів*.

Інтенсивність розмноження електронів у лавині характеризується *коефіцієнтом ударної іонізації α* , що дорівнює числу іонізацій, вироблених електроном на шляху в 1 см за напрямком дії електричного поля. Інша назва коефіцієнта ударної іонізації – перший коефіцієнт Таунсенда.

У процесі розвитку лавини одночасно з електронами утворюються позитивні іони. Рухливість іонів значно менша, ніж електронів, і за час розвитку лавини вони практично не встигають переміститися в проміжку до катода. Таким чином, після проходження лавини електронів у газі залишаються позитивні, а в електронегативних газах і негативні іони, які спотворюють (зменшують або збільшують) зовнішнє електричне поле в проміжку. На рис. 2.1 наведений розподіл напруженості електричного поля в проміжку при проходженні його лавиною електронів. Видно, що напруженість електричного поля на фронті лавини зростає, у середній частині, де перебувають позитивні іони, що залишаються, зменшується, а поблизу катода – знову незначно збільшується.

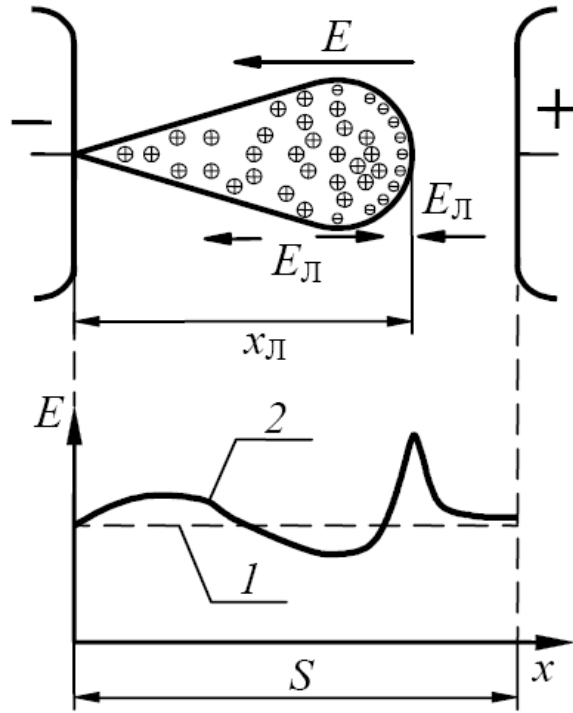


Рис. 2.1. Спотворення електричного поля в проміжку, що створюється лавиною:
1 – середня напруженість без лавини; 2 – результуюча напруженість

Для опису лавинного процесу необхідно визначити число електронів у лавині. Припустимо, що з катода за рахунок зовнішнього іонізатора виривається n_0 електронів (наприклад, $n_0=1$). На відстані x від катода число електронів зросло до n (рис. 2.2). Збільшення числа електронів dn на шляху dx буде дорівнювати

$$dn = n \cdot \alpha \cdot dx, \quad (2.1)$$

або

$$\frac{dn}{n} = \alpha \cdot dx. \quad (2.2)$$

Інтегруючи (2.2) по n від 1 до n і по x від 0 до x , одержимо

$$\int_1^n \frac{dn}{n} = \int_0^x \alpha \cdot dx. \quad (2.3)$$

В однорідному полі, де коефіцієнт ударної іонізації $\alpha = \text{const}$, тому що напруженість у будь-якій точці проміжку однакова, будемо мати

$$\ln n = \alpha \cdot x, \quad (2.4)$$

або

$$n = e^{\alpha \cdot x} . \quad (2.5)$$

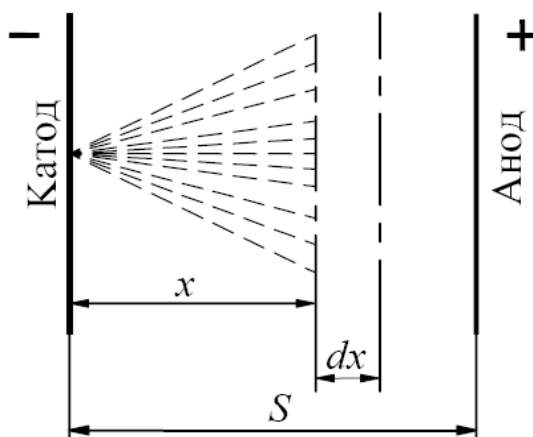


Рис. 2.2. Схема визначення числа електронів у лавині

Вираз (2.5) дає значення електронів у лавині без урахування їх прилипання до нейтральних атомів і молекул. Це явище характеризується коефіцієнтом прилипання η . Коефіцієнт прилипання залежить від роду газу (електронегативний або електропозитивний). Тоді число електронів у лавині з урахуванням прилипання буде дорівнювати

$$n = e^{(\alpha - \eta)x} . \quad (2.6)$$

Якщо η_0 більше 1, тоді (2.6) буде мати вигляд

$$n = n_0 e^{(\alpha - \eta)x} . \quad (2.7)$$

2.2 Умова самостійності розряду

Після проходження першої лавини в проміжку лавинний процес може відновлятися, а може й загаснути. Для поновлення лавинного процесу потрібний хоча б один *вторинний ефективний електрон*. Якщо цей електрон утворюється у результаті зовнішнього іонізатора, розряд називається *несамостійним*, тобто якщо усунути зовнішній іонізатор, то лавинний процес не відновиться і розряд загасне. Якщо ж вторинний ефективний електрон

виникає в результаті проходження первинної лавини, розряд називається *самостійним*. Розряд з несамостійного може перейти в самостійний, якщо збільшити прикладену до електродів напругу.

При самостійній формі розряду лавинний процес відновляється, оскільки сама первинна лавина (і наступні вторинні теж) створюють умову для поновлення процесу. Умови поновлення:

1) позитивні іони, що залишилися після проходження лавини, рухаючись до катода, бомбардують його й викликають емісію електронів з катода;

2) збуджені атоми й молекули, що утворюються поряд з іонізацією, випускають фотони, які можуть призводити як до фотоіонізації в об'ємі проміжку, так і до фотоемісії електронів з катода. *Вторинні* електрони, що утворюються таким чином, призводять знову до утворення лавин у розрядному проміжку.

Кількість позитивних іонів, що залишилися в проміжку після проходження лавини, дорівнює кількості електронів у лавині (2.6), крім початкового електрона, тобто

$$n_i^+ = e^{(\alpha-\eta)S} - 1. \quad (2.8)$$

Електрони, вибиті з катода, не всі беруть участь в утворенні вторинних лавин. Частина електронів рекомбінують з позитивними іонами. Сумарний процес утворення вторинних електронів з катода характеризується *коефіцієнтом вторинної іонізації γ* (другий коефіцієнт Таунсенда). Коефіцієнт γ залежить від матеріалу катода, складу та тиску газу, і завжди $\gamma \ll 1$. Кількість вторинних електронів, що утворюються після проходження первинної лавини, при самостійній формі розряду буде

$$\gamma(e^{(\alpha-\eta)S} - 1) \geq 1. \quad (2.9)$$

Рівняння (2.9) є умовою самостійності розвитку розряду в газовому проміжку. Воно показує, що в результаті проходження первинної лавини необхідне утворення, як мінімум, одного *ефективного електрона*, здатного запалити вторинну лавину.

2.3 Утворення стрімера

У процесі розвитку лавини безупинно збільшується число електронів і позитивних іонів. Зі збільшенням числа електронів у головці лавини зростає напруженість на фронті лавини (рис. 2.1). На хвості лавини напруженість знижена. Електрони в головці лавини зупиняються і можуть рекомбінувати із іонами. При рекомбінації випромінюються фотони, які здатні поблизу хвоста первинної лавини іонізувати нейтральні молекули, утворюючи вторинні лавини.

Вторинні лавини, ідучи за силовими лініями і маючи на головці надлишковий негативний заряд (електрони), втягуються в область позитивного об'ємного заряду, що залишається первинною лавиною. Електрони вторинних лавин змішуються з позитивними іонами первинної лавини й утворюють стрімер – область із найбільшою щільністю струму, що, розігріваючись, починає світитися, а найбільша концентрація частинок (щільність струму) утворюється поблизу катода. Картина утворення стрімера наведена на рис. 2.3.

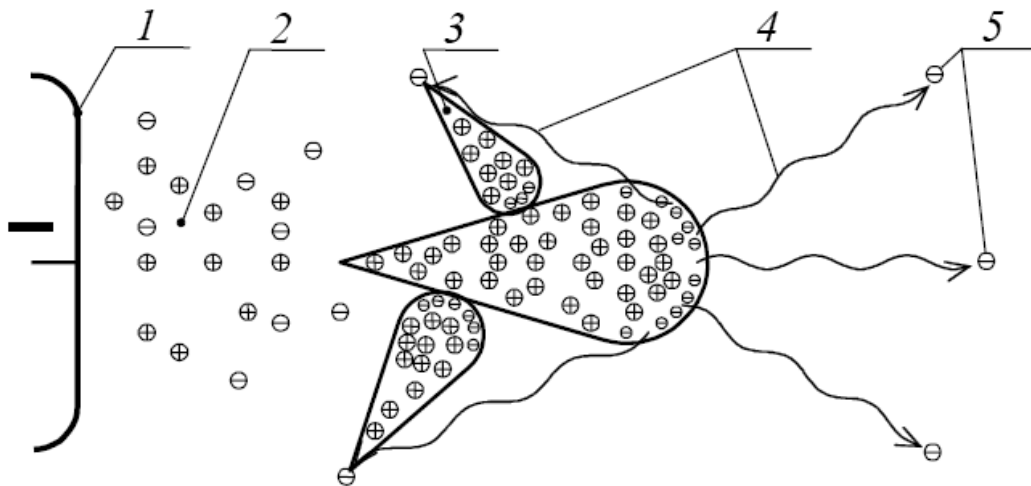


Рис. 2.3. Механізм розвитку катодного стрімера:

- 1 – електрод (катод); 2 – канал стрімера; 3 – лавини;
- 4 – рух фотонів; 5 – електрони за рахунок фотоіонізації

Для фотоіонізації в об'ємі газу енергія фотонів повинна бути більше енергії іонізації. Цей процес успішно здійснюється в сумішах газів, що містять компоненти з відносно низькою енергією іонізації (у тому числі й у повітрі). Бомбардування катода позитивними іонами ефективно при низьких тисках газу.

Критерієм переходу лавинного розряду в стрімерний є критичне число електронів у лавині. Розрахунки показують, що при числі електронів $n_{кр} \geq 10^7 - 10^9$ лавина переходить у стрімер. Для нагромадження такої кількості електронів лавина повинна пройти певну критичну відстань $x_{кр}$. Отже, зі збільшенням відстані між електродами (понад $x_{кр}$) лавина неминуче перейде в стрімерну форму розвитку розряду. Необхідно відзначити, що $x_{кр}$ залежить від тиску газу і його складу.

2.4 Закон Пашена

Виконання умови самостійності розряду (2.9) в однорідному полі означає пробій усього проміжку. Приймаючи $\eta = 0$ й дорівнявши (2.9) до одиниці, одержимо

$$\gamma(e^{\alpha S} - 1) = 1 \quad (2.10)$$

або

$$e^{\alpha S} = 1 + \frac{1}{\gamma}. \quad (2.11)$$

Прологарифмуємо вираз (2.11) й перетворимо його відносно α :

$$\alpha = \frac{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}{S}. \quad (2.12)$$

Експериментально встановлено, що

$$\alpha = A_0 p e^{-\frac{B_0 p}{E}}, \quad (2.13)$$

де p – тиск газу;

E – напруженість електричного поля;

A_0 – коефіцієнт, що залежить від складу газу:

$$A_0 = \frac{\pi \cdot r^2}{kT},$$

де r – радіус молекул;

k – постійна Больцмана;

T – температура в градусах Кельвіна;

B_0 – коефіцієнт, що залежить від енергії іонізації газу:

$$B_0 = A_0 U_i,$$

де U_i – потенціал іонізації газу.

Дорівнявши вирази для α (2.12) й (2.13), одержимо

$$\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) = A_0 p S e^{-\frac{B_0 p}{E}}. \quad (2.14)$$

Підставивши в (2.14) $E = \frac{U}{S}$, маємо

$$\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) = A_0 p S e^{-\frac{B_0 p S}{U}},$$

або

$$e^{\frac{B_0 p S}{U}} = \frac{A_0 p S}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)}. \quad (2.15)$$

Прологарифмуємо вираз (2.15), тоді

$$\frac{B_0 p S}{U} = \ln \frac{A_0 p S}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)}. \quad (2.16)$$

Оскільки нас цікавить напруга, при якій відбудеться пробій, дорівняємо $U = U_{np}$. Тоді з виразу (2.16)

$$U_{np} = \frac{B_0 p S}{\ln \frac{A_0 p S}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)}} \quad (2.17)$$

З рівняння (2.17) видно, що при незмінній температурі розрядна напруга в однорідному полі є функцією добутку тиску p на відстань між електродами S , тобто

$$U_{np} = f(pS).$$

Цю закономірність уперше експериментально виявив Пашен, і вираз (2.17) називається законом Пашена. Графічно ця закономірність представлена на рис. 2.4.

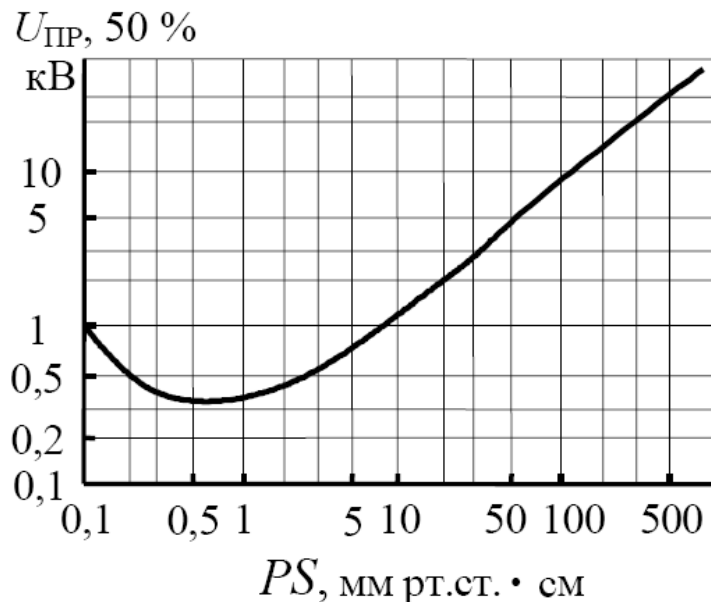


Рис. 2.4. Графічне відображення закону Пашена для повітря

На рис. 2.5 показані криві Пашена для повітря, водню й аргону. Необхідно відзначити, що мінімальні значення пробивних напруг для різних газів різні, як видно із кривих. Це є експериментальним підтвердженням теоретичної залежності закону Пашена – рівняння (2.17).

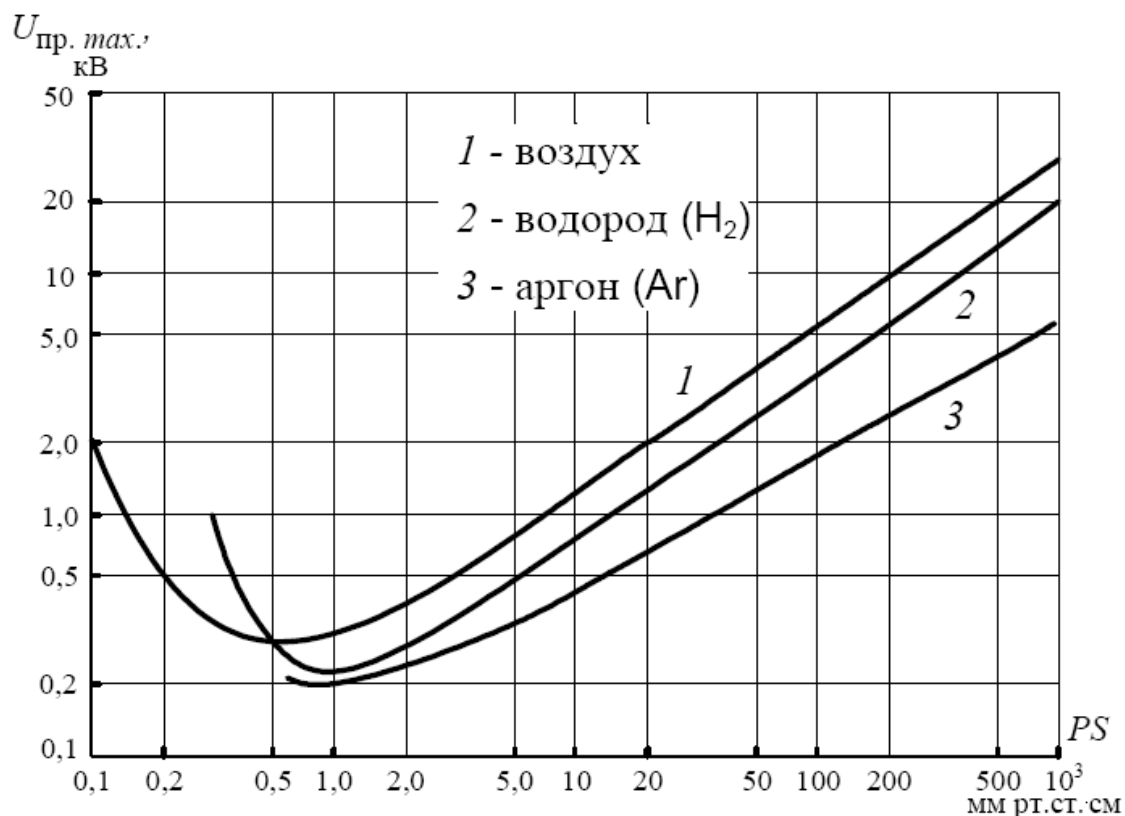


Рис. 2.5. Криві Пашена для повітря, водню й аргону

Вид цієї залежності можна пояснити, виходячи з фізичних уявлень. При $S = \text{const}$ збільшення тиску, більше значення, що відповідає мінімуму, призводить до збільшення числа зіткнень електронів з нейтральними атомами й молекулами і, як наслідок, до зменшення їхньої енергії, що накопичується на довжині вільного пробігу. Отже, для виникнення ударної іонізації необхідне збільшення напруги $U_{пр}$. З іншого боку, при тисках, менших мінімуму пробивної напруги $U_{пр}$, збільшується довжина вільного пробігу та енергія, що накопичується електроном, але зменшується кількість зіткнень, що зменшує ймовірність ударної іонізації. Для її збільшення необхідно, щоб як можна більше число зіткнень закінчувалося іонізацією. Для цього необхідно збільшувати енергію електрона на довжині вільного пробігу, тобто збільшувати $U_{пр}$.

Закон Пашена у вигляді формули (2.17) справедливий при нормальній температурі. Зміна температури діє обернено зміні тиску й повинна

враховуватися при розрахунках. У загальному вигляді, з урахуванням зміни температури, закон Пашена запишеться так:

$$U_{np} = f\left(\frac{pS}{T}\right),$$

або

$$U_{np} = f(\delta S),$$

де

$$\delta = \frac{T_0 \cdot p}{p_0 \cdot T} = 0.386 \frac{p}{T},$$

T – температура в градусах Кельвіна.

Тоді

$$U_{np\ d} = U_{np\ p} \cdot \delta,$$

де $U_{np\ d}$ – пробивна напруга, приведена до дійсних умов виміру;

$U_{np\ p}$ – пробивна напруга, отримана при розрахунку за формулою Пашена.

Експериментальна крива Пашена відрізняється від розрахункової як в області дуже малих значень pS , так і в області дуже великих. В області дуже малих значень pS відмінність пояснюється наближенням до вакуумного пробою, при якому основну роль відіграють процеси на поверхні електродів, а не в об'ємі газу. При великих значеннях pS відмінність пояснюється збільшенням напруженості електричного поля на мікроступах електродів і збільшенням імовірності виникнення лавин, що знижує U_{np} .

На підставі закону Пашена можуть бути запропоновані способи підвищення пробивної напруги газів:

- 1) збільшення тиску більше атмосферного;
- 2) зменшення тиску до значень, менших, ніж тиск, що відповідає мінімуму, аж до вакууму.

Аналіз основних електричних характеристик деяких газів при нормальних умовах (табл. 1.2), показує, що існують гази, у яких електрична

міцність вища, ніж у повітря, у шість і більше разів. Це, як правило, електронегативні гази. Найбільш широке поширення в енергетиці одержав елегаз (SF_6).

Таблиця 1.2

Електричні характеристики газів при температурі +20 °С та тиску 760 мм рт. ст. (101326 Па)

Діелектрик	E_{np} , кВ/см	ϵ	$T_{кип}$, °С	Властивості	Хімічна сполука
Повітря	30	1.00059	-194.0	Електро- негаивний	$N_2, O_2, Ar,$ CO_2, H_2
Азот	29	1.00058	-195.8	Електро- негаивний	N_2
Аргон	7.0	1.00056	-186.0	Електро- позитивний	Ar
Водень	18	1.00027	-252.8	Електро- позитивний	H_2
Вуглекислий газ	27	1.00096	-78.5	Електро- позитивний	CO_2
Елегаз (гексафторид сірки)	72	1.00191	-63.8	Електро- негаивний	SF_6
Фреон-11 (трихлорфторметан)	90-132	1.0016	-24.1	Електро- негаивний	CCl_3F
Тетрафторметан	189	1.0006	-127.9	Електро- негаивний	CCl_4

2.5 Розряд у неоднорідних полях

У неоднорідному полі, на відміну від однорідного, напруженість поля в різних точках проміжку різна за *величиною* або за *напрямком*. До типових проміжків з неоднорідним полем належать: стрижень-стрижень, стрижень-площина, провід-земля та багато інших реальних ізоляційних проміжків.

На рис. 2.6 наведені залежності напруженостей від відстані між електродами типу стрижень-площина.

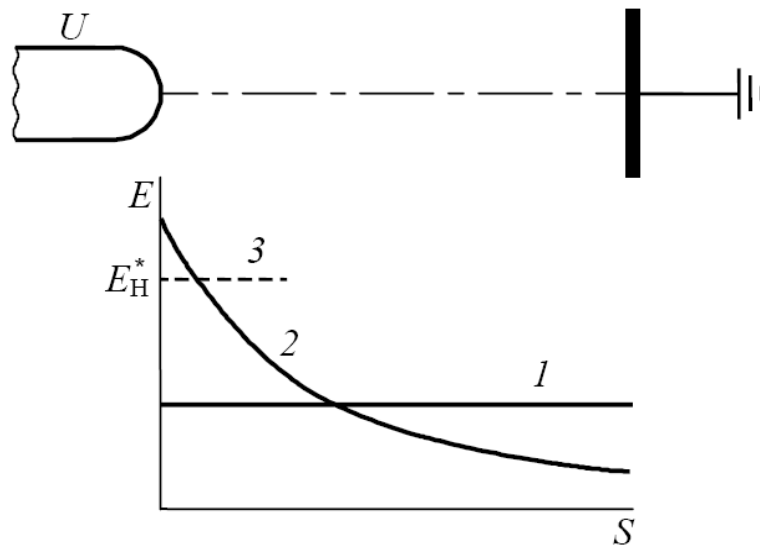


Рис. 2.6. Залежність напруженості електричного поля від відстані між електродами типу стрижень-площина:

1 – $E_{cp} = f(S) = U/S$; 2 – $E_{max} = f(S)$; 3 – E_H^* – напруженість виникнення самостійної форми розряду

Основні закономірності розвитку розряду в будь-яких різконеоднорідних полях ($K_H > 4$) практично однакові. При деякій початковій напрузі U_H в проміжку виникає самостійний розряд у лавинній формі, тому що поблизу стрижня є область із напруженістю, що перевищує значення, що відповідає виникненню самостійної форми розряду (рис. 2.6). Розряд локалізується в цій області, а вторинні лавини підтримуються або за рахунок фотоіонізації з об'єму газу (при позитивній полярності стрижня), або за рахунок фотоемісії або автоелектронній (холодній) емісії з катода (при негативній полярності

стрижня). Такий розряд називається *коронним розрядом у лавинній формі*. Значення напруги й напруженості поля на електроді при виникненні коронного розряду залежить від ступеня неоднорідності поля. Зі збільшенням ступеня неоднорідності напруженість на електроді-стрижні збільшується, а напруга виникнення корони зменшується.

При збільшенні напруги понад U_n , коли кількість електронів у лавині зростає до 10^7 – 10^9 , вона переходить у плазмовий стан і в проміжку виникає *стрімер* біля електрода з підвищеною напруженістю поля. Якщо в однорідному полі стрімер, що виникає перетинає весь міжелектродний проміжок, то в *різконеоднорідному* поле, залежно від величини напруги, стрімер, пройшовши деяку відстань, може зупинитися. При цьому плазма його розпадається, але поблизу вістря виникають нові стрімери, які також зупиняються і їхня плазма розпадається.

Такий стан розряду – стійкий, тому що при цьому виконується умова самостійності розряду. Цей випадок, коли стрімери не досягають протилежного електрода, одержав назву *коронного розряду в стрімерній формі*.

Для пробою всього міжелектродного проміжку необхідно ще збільшити напругу. Тоді утвориться канал, що просувається від електрода з підвищеною напруженістю (вістря) до протилежного електрода. При перетинанні іскровим каналом усього проміжку він перетворюється в електричну дугу, що означає завершення пробою. У *різконеоднорідних* полях напруга пробою завжди більше напруги виникнення коронного розряду в будь-якій формі.

3. ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В ДІЕЛЕКТРИКАХ (Частина 3)

3.1 Ефект полярності

У *слабонеоднорідних* полях, де максимальний і середній градієнти напруги мало відрізняються один від одного, коронна та розрядна напруги практично збігаються одна з одною, вплив полярності невеликий.

У *різконеоднорідному* полі коронна напруга набагато нижча розрядної, полярність при несиметричних електродах істотно впливає на величину розрядної напруги. У проміжку вістря-площина формування розряду залежить від полярності вістря.

При *позитивній полярності вістря* наявні в проміжку електрони, рухаючись до вістря в область сильного поля, здійснюють ударну іонізацію і утворюють лавину електронів. Коли лавина доходить до вістря, електрони лавини нейтралізуються на аноді, а позитивні іони внаслідок малої швидкості руху залишаються біля вістря й створюють позитивний об'ємний заряд (ПОЗ), що має власне електричне поле. Взаємодіючи із зовнішнім полем у проміжку, позитивний об'ємний заряд послаблює поле поблизу вістря і підсилює його в іншій частині проміжку (рис. 3.1а). Якщо напруга між електродами досить велика, то виникає лавина електронів праворуч від об'ємного заряду, електрони якої, змішуючись із позитивними іонами об'ємного заряду, створюють зародок каналу анодного стрімера, що заповнений плазмою. Запалюється стрімерний коронний розряд. Позитивні заряди цієї лавини будуть розташовуватися на головці стрімера та створювати область підвищеної напруженості в зовнішньому просторі. Наявність області сильного поля забезпечує утворення нових лавин, електрони яких втягуються в канал стрімера, поступово подовжуючи його. Стрімер проростає до катода, викликаючи пробій проміжку, при порівняно малім значенні розрядної напруги.

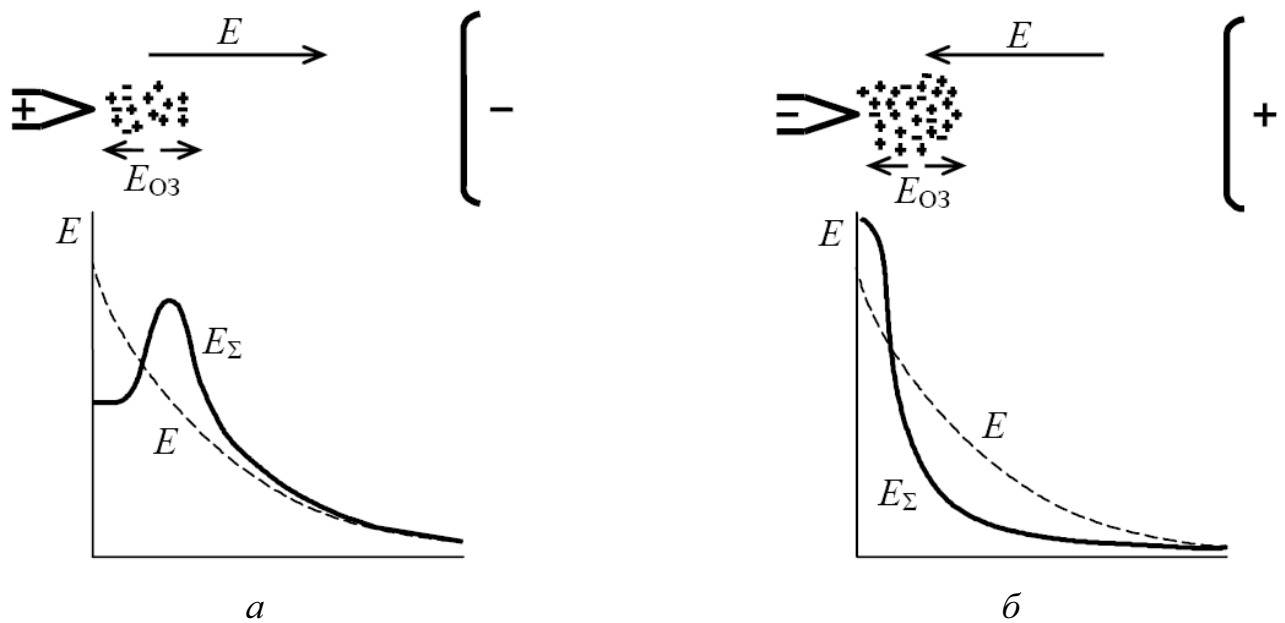


Рис. 3.1. Утворення анодного (а) і катодного (б) стрімера:

E – напруженість зовнішнього поля; E_{O3} – напруженість поля об'ємного позитивного заряду; E_{Σ} – результуюча напруженість у проміжку після іонізації

При *негативній полярності вістрія* електричне поле безпосередньо у вістрія призводить до емісії електронів з катода, які відразу потрапляють у сильне поле й здійснюють ударну іонізацію, утворюючи велику кількість лавин. Електрони лавин, переміщаючись у слабке поле біля анода, втрачають швидкість, захоплюються нейтральними молекулами, стають негативними іонами, розсіяними в просторі. Позитивні іони лавин утворюють об'ємний заряд біля вістрія, що, взаємодіючи із зовнішнім полем, буде збільшувати напруженість безпосередньо біля вістрія та зменшувати – в іншій частині проміжку (рис. 3.1б). Збільшення поля біля вістрія призводить до посилення емісії електронів з поверхні катода, які, змішуючись із позитивним об'ємним зарядом, утворюють біля катода зародок катодного стрімера.

Внаслідок великої кількості початкових лавин біля катода, плазмовий канал, в цьому місці являє собою більш-менш однорідний шар з радіусом кривизни більшим, ніж біля вістрія. Тому електричне поле трохи вирівнюється і напруженість у зовнішній області зменшується.

Зменшення напруженості електричного поля в зовнішньому просторі призводить до того, що для подальшої іонізації в цій частині проміжку необхідно значно збільшити різницю потенціалів між електродами.

При подальшому збільшенні напруги відбувається іонізація праворуч від плазмового шару. Велика кількість лавин, що утворюються призводить до подовження стрімера. Однак, так само як і на початку, завдяки великій кількості лавин, головка стрімера розмита, і зростання напруженості на головці стрімера виявляється набагато меншим, ніж при позитивному вістрі.

У силу розглянутих вище особливостей розвиток стрімера при негативному вістрі відбувається з великими труднощами, тому розрядна напруга при негативній полярності вістря в 2–2,5 рази більше, ніж при позитивній полярності (рис. 3.2).

На змінній напрузі пробій відбувається завжди на позитивній полярності.

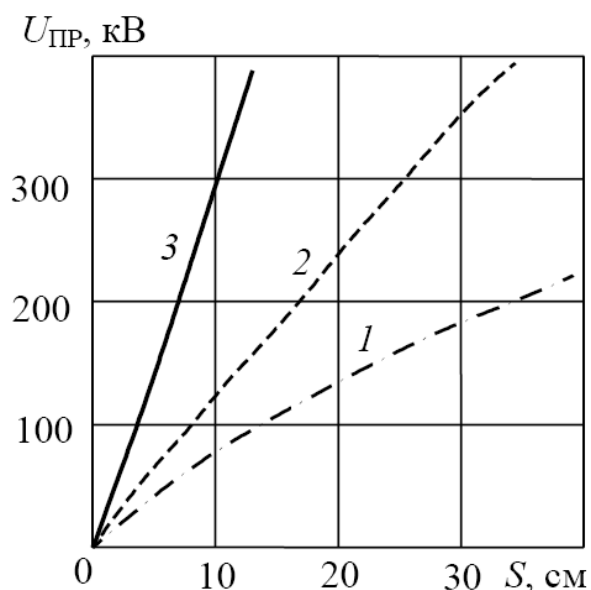


Рис. 3.2. Залежність пробивної напруги від відстані між електродами стрижень-площина на імпульсній напрузі:

- 1 – позитивна полярність вістря; 2 – негативна полярність вістря;
3 – однорідне поле

Перераховані фактори визначають основні відмінності закономірностей пробою проміжку з різконеоднорідним полем (РНП) від проміжку із слабонеоднорідним електричним полем (СНП), які зводяться до наступного:

- електрична міцність проміжку із РНП істотно менше електричної міцності проміжку із СНП; так, при нормальних умовах електрична міцність повітря при відстанях між електродами порядку десятків сантиметрів становить приблизно 30 кВ/см для однорідного поля і знижується до одиниць кіловольтів на сантиметр для проміжку із РНП;
- при порівняно невеликих напруженностях електричного поля в проміжку із РНП спостерігається явище корони, тобто самостійного електричного розряду поблизу стрижня, що супроводжується світінням і потріскуванням, при якому тільки частина проміжку стає провідною, а проміжок у цілому зберігає ізоляційні властивості;
- напруга початку корони залежить від полярності стрижня; при негативному стрижні корона починається при істотно меншій напрузі, ніж при позитивному вістрі;
- ефект полярності спостерігається і при пробії проміжку із РНП: при позитивному стрижні напруга пробією в 2–2.5 рази менша, ніж при негативному стрижні.

3.2 Бар'єрний ефект

Істотний вплив об'ємного заряду на розвиток розряду в проміжку з різконеоднорідним полем використовується на практиці для збільшення розрядних напруг ізоляційних проміжків. Це збільшення досягається поміщенням у проміжок бар'єрів із твердого діелектрика (електрокартон, гетинакс та ін.).

При *позитивному вістрі* позитивні іони осідають на бар'єр і розтікаються по його поверхні тим рівномірніше, чим далі від вістря розташований бар'єр. Це призводить до більш рівномірного розподілу напруженості в проміжку між бар'єром і площиною (рис. 3.3а) і, отже, до значного збільшення розрядної напруги.

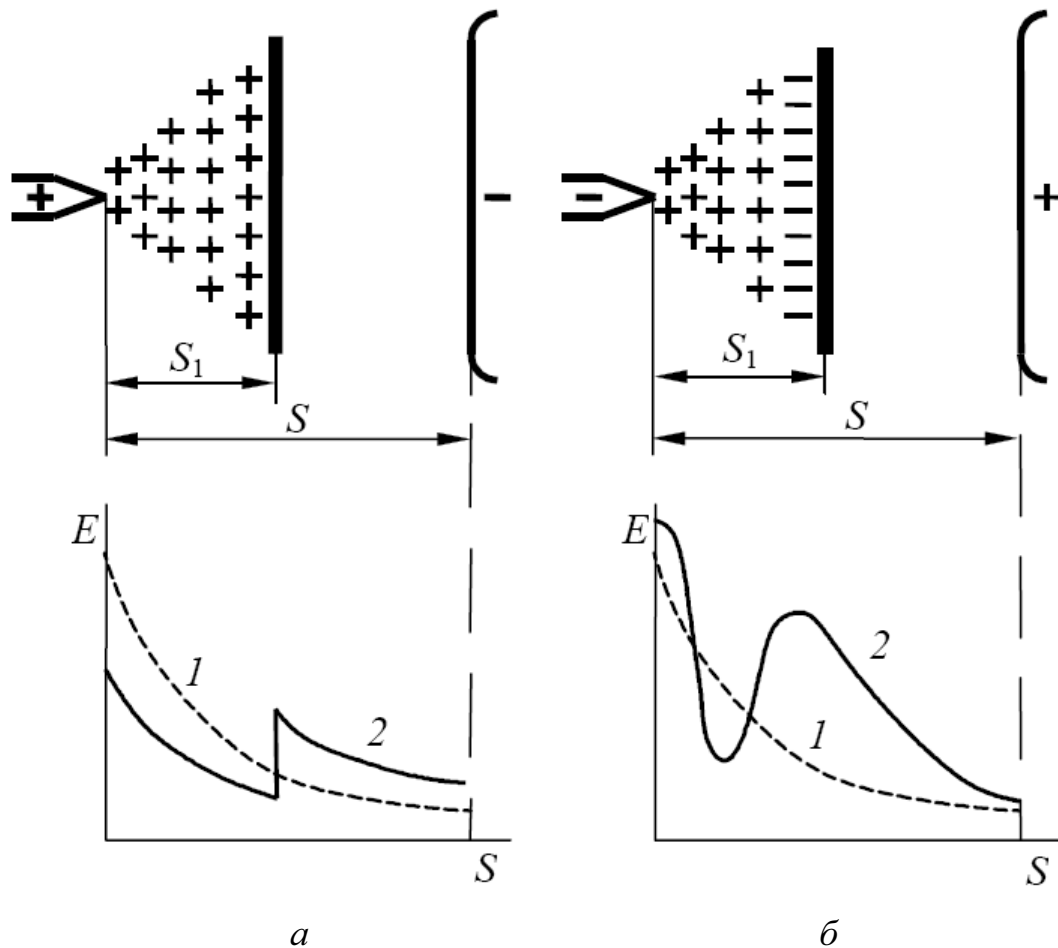


Рис. 3.3. Розподіл напруженості поля в міжелектродному проміжку при наявності бар'єра:

a – позитивна полярність стрижня; *б* – негативна полярність стрижня;

1 – розподіл напруженості поля без бар'єра;

2 – розподіл напруженості поля з бар'єром

При *негативній полярності стрижня* електрони, рухаючись від вістря, потрапляють на бар'єр, втрачають швидкість і більшість із них разом з атомами кисню стають негативними іонами. На бар'єрі в цьому випадку з'являється концентрований негативний заряд, що збільшує напруженість поля не тільки між позитивним об'ємним зарядом біля вістря і бар'єром, але й у зовнішньому просторі (рис. 3.3б). Тому при негативній полярності вістря збільшення розрядної напруги в проміжку при наявності бар'єра буде незначним. При розташуванні бар'єра в середній частині проміжку розрядні напруги при негативній і позитивній полярностях близькі.

При розташуванні бар'єра в безпосередній близькості від позитивного вістря роль його зменшується внаслідок різкої нерівномірності розподілу зарядів на бар'єрі. Напруженість поля виявляється достатньою для того, щоб іонізаційні процеси проходили на іншу сторону бар'єра. Бар'єр, розташований у безпосередній близькості від негативного вістря, не здатний затримувати швидкі електрони із вістря, які проходять крізь бар'єр до площини.

Таким чином, бар'єри в проміжку встановлюються на такій оптимальній відстані від вістря, при якій розрядні напруги максимальні (25–30 % від довжини проміжку між електродами), причому при позитивній полярності вістря розрядна напруга може збільшитися в 2 рази в порівнянні із проміжком такої ж довжини, але без бар'єра (рис. 3.4).

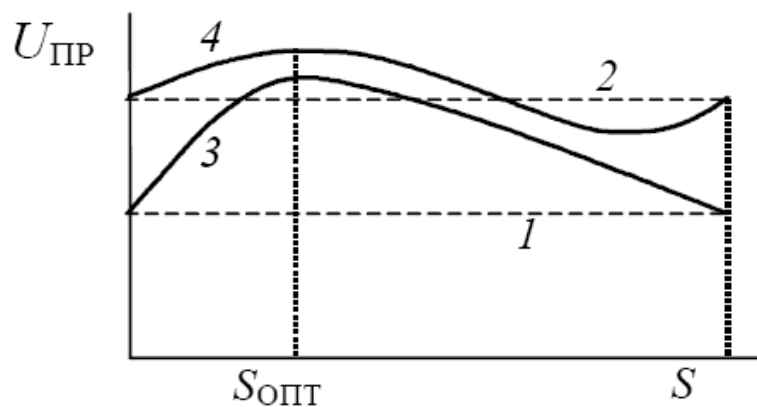


Рис. 3.4. Вплив бар'єра на пробивну напругу газового проміжку при позитивній (1, 3) і негативній (2, 4) полярностях напруги:

прямі 1 і 2 – пробивна напруга проміжку без бар'єра;

криві 3 і 4 – пробивна напруга проміжку з бар'єром

Бар'єри широко використовуються у високовольтних конструкціях, що працюють як у повітрі, так і в маслі (високовольтні вводи, трансформатори й ін.). На змінній напрузі електрична міцність на позитивній полярності збільшується та наближається до електричної міцності на негативній полярності.

3.3 Вплив часу прикладання напруги на електричну міцність газової ізоляції. Вольт-секундна характеристика (ВСХ)

При короткочасних імпульсах значення розрядної напруги повітряних проміжків залежить від тривалості впливу. Якщо до проміжку прикладена напруга, достатня для пробою, то для розвитку і завершення розряду в проміжку необхідний певний час t_p , що називається часом розряду (рис. 3.5).

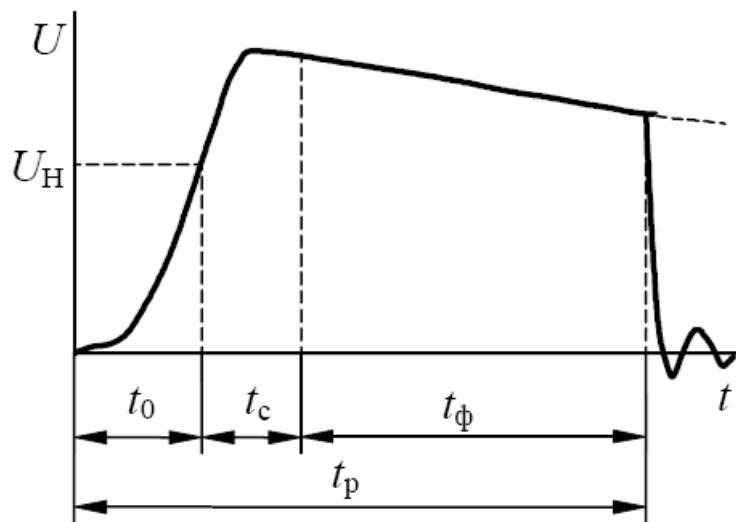


Рис. 3.5. Часова структура розвитку розряду на імпульсній напрузі

Розвиток самостійного розряду починається з появи в проміжку ефективного початкового електрона, що є випадковою подією. Час очікування ефективного електрона t_c піддається розкиду і тому називається статистичним часом запізнювання розряду. Це перша складова часу розряду. Іншою складовою, що має також статистичний характер, є час формування розряду t_ϕ , тобто час від моменту появи початкового електрона до завершення пробою проміжку. Час $t_c + t_\phi = t_z$ називають часом запізнювання розвитку розряду. При досить великій тривалості фронту імпульсу має значення також час t_0 , що становить собою час підйому напруги до значення U_H . Таким чином, у загальному випадку час розряду визначається так:

$$t_p = t_0 + t_c + t_\phi \quad (3.1)$$

Складові часу розряду t_c і t_ϕ залежать від значення напруги на проміжку. При збільшенні напруги підвищується ймовірність того, що електрони, що з'являються в проміжку, стануть ефективними і t_c зменшиться. Скорочується також і t_ϕ , оскільки при більшій напрузі зростає інтенсивність розрядних процесів і швидкість просування каналу розряду в проміжку. Тому чим вище розрядна напруга, тим менше час розряду.

Залежність максимальної напруги розряду від часу дії імпульсу називається вольт-секундною характеристикою ізоляції. Оскільки початок і швидкість розвитку іонізаційних процесів залежать від значення напруги, вольт-секундні характеристики залежать від форми імпульсу. З метою уніфікації випробувань і можливості зіставлення ізоляційних конструкцій встановлений стандартний грозовий імпульс із тривалістю фронту (зростання напруги) $\tau_\phi = 1.2 \pm 0.4$ мкс і тривалістю імпульсу $\tau_u = 50 \pm 10$ мкс. Він позначається так: 1,2/50 мкс (рис. 3.6).

Для експериментального визначення вольт-секундної характеристики до досліджуваного проміжку прикладаються імпульси стандартної форми. При кожному значенні максимальної напруги імпульсу провадиться серія досвідів. У силу статистичного розкиду часу розряду вольт-секундна характеристика виходить у вигляді області точок (рис. 3.7), для якої вказуються середня крива та межі розкиду часу розряду.

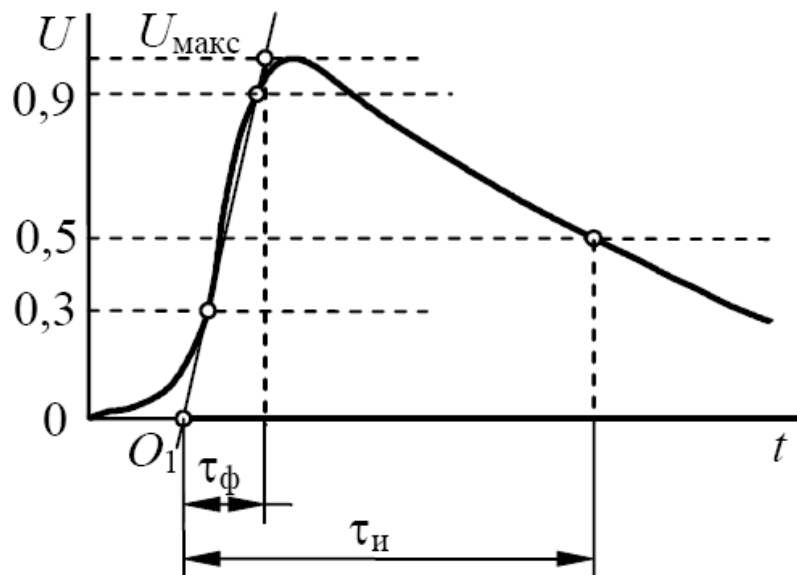


Рис. 3.6. Визначення параметрів імпульсу напруги

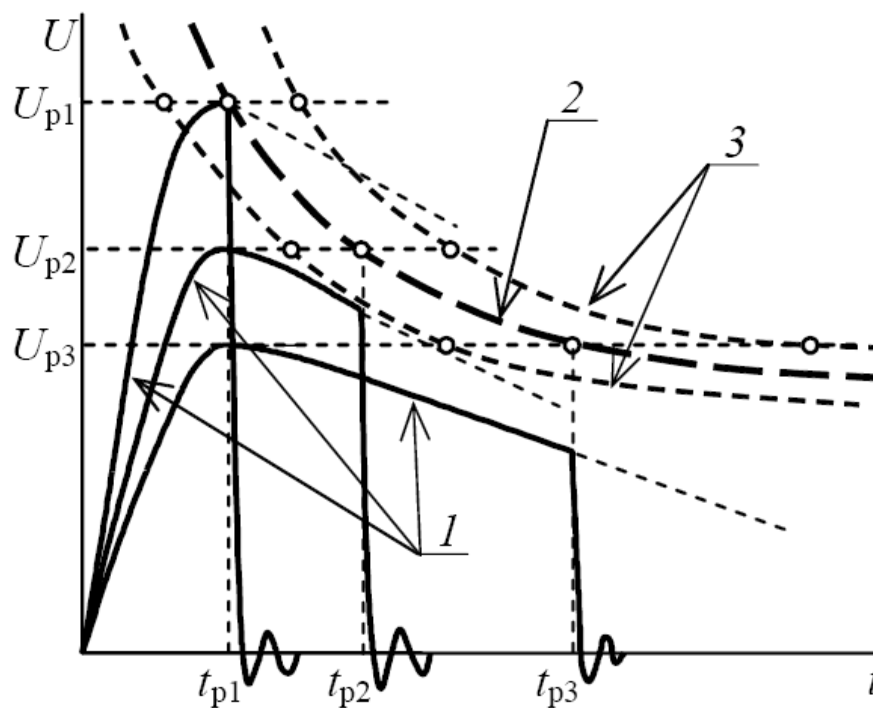


Рис. 3.7. Побудова вольт-секундної характеристики ізоляції
за дослідними даними (грозові імпульси):

- 1 – імпульси напруги; 2 – крива середніх значень пробивної напруги;
3 – межі розкиду пробивних напруг

Вигляд вольт-секундної характеристики залежить від ступеня неоднорідності електричного поля в проміжку. Для проміжків з однорідним або

слабонеоднорідним полем вольт-секундна характеристика слабо залежить від t_p (рис. 3.8, крива 1), і тільки при значенні часу розряду порядку 1 мкс і менше розрядна напруга збільшується. Пов'язано це з тим, що розряд у таких проміжках формується за досить малий час при напрузі, що дорівнює початковому значенню, та відсутня корона. Відзначені властивості вольт-секундної характеристики дозволяють використовувати проміжок між кульовими електродами, що створюють практично однорідне поле, якщо відстань між електродами менше їхнього радіуса, як універсальний прилад для виміру максимальних значень напруги.

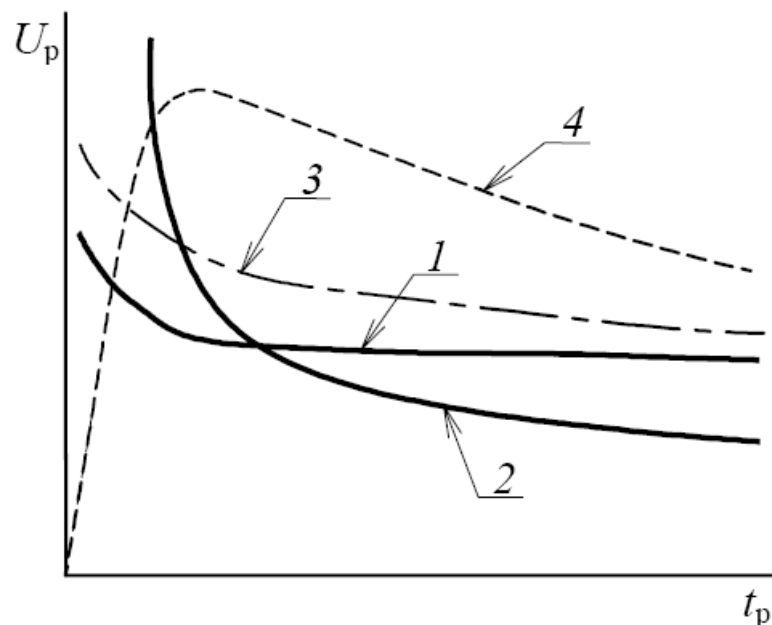


Рис. 3.8. ВСХ захисних розрядників і ізоляції:

- 1 – ВСХ вентильного розрядника (однорідне поле);
- 2 – ВСХ трубчастого розрядника (різконеоднорідне поле);
- 3 – ВСХ об'єкта, що захищається; 4 – імпульс напруги

Вольт-секундні характеристики проміжків із різконеоднорідним полем (рис. 3.8, крива 2) мають досить велику крутість, оскільки в таких проміжках час формування розряду сильно залежить від значення прикладеної напруги.

Для таких проміжків при грозових імпульсах характерні більші розрядні напруги U_p , ніж при змінній напрузі промислової частоти 50 Гц.

Відношення

$$K_{imp} = \frac{U_p}{U}, \quad (3.2)$$

називається *коефіцієнтом імпульсу*.

Проміжки із однорідним та слабонеоднорідними полями мають коефіцієнт імпульсу $K_{imp} = 1$ практично у всьому діапазоні часів розряду.

Вольт-секундні характеристики широко використовуються для координації ізоляції високовольтного обладнання, тобто для захисту від впливу грозових і комутаційних перенапруг. Із цією метою паралельно об'єкту, що захищається, включається повітряний розрядник (наприклад, вентильний розрядник) з пологою ВСХ. Надійний захист буде забезпечуватися, якщо ВСХ розрядника (3.8, крива 1) лежить нижче ВСХ обладнання, що захищається, (крива 3) у всьому діапазоні часу напруги, що впливає.

3.4 Розрахунок напруги пробою між двома металевими сферами

Розглянемо можливість розрахунку напруг пробою, між двома однаковими металевими сферами (рис. 3.9), така система електродів широко використовується для вимірювання амплітуд напруги.

Оскільки уздовж найкоротшої силової лінії довжиною S напруженість E_x не постійна і змінюється коефіцієнт ударної іонізації $\alpha(x)$, то умова самостійності розряду має такий вигляд:

$$\int_{x=0}^{x=S} \alpha(x) dx = C, \quad (3.3)$$

де постійна C уточнюється для окремих випадків розрядних проміжків зі слабонеоднорідним полем.

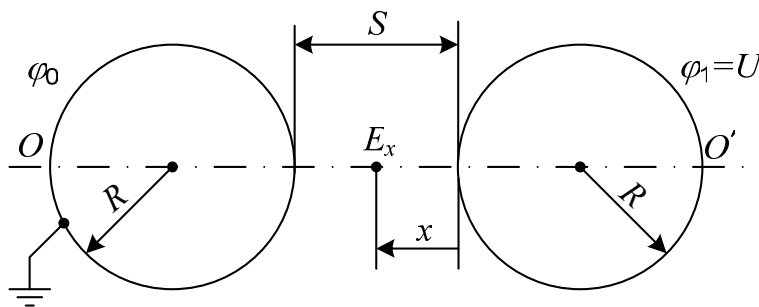


Рис. 3.9

Різні потенціали заземленої (φ_0) і потенційної ($\varphi_1 = U$) сфер у діелектрику з ε визначають електричне поле між сферами, причому поле симетричне відносно $O - O'$. Оскільки

$$E_x = F_1(U, x, \varepsilon), \quad (3.4)$$

то

$$\alpha = F_2(E, x, \delta) = F_3(U, x, \varepsilon, \delta). \quad (3.5)$$

Згідно (3.3) умова пробою проміжку S при мінімально необхідній для цього напрузі U_{np} визначається як:

$$\int_{x=0}^{x=S} F_3(U_{np}, x, \varepsilon, \delta) dx = C. \quad (3.6)$$

Шукана напруга U_{np} безпосереднім розв'язанням рівняння (3.6) одержати не можна. Знаходження U_{np} для заданих умов ($S, R, \varepsilon, \delta$) здійснюють у послідовних наближеннях чисельним методом, причому принциповим стає визначення E_x .

Один з ефективних методів розрахунку електростатичного поля, відомий як метод еквівалентних зарядів, заснований на застосуванні системи рівнянь Максвелла. У випадку електростатики, коли характеристики поля постійні в часі та немає струмів у діелектричному середовищі, виконується наступне рівняння в інтегральній формі:

$$\int_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = Q, \quad (3.7)$$

де $\vec{D}$ – вектор зсуву.

При розгляді конкретної ситуації необхідно враховувати електромагнітні властивості матеріального середовища, використовуючи співвідношення

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E}. \quad (3.8)$$

Так, якщо навколо точкового заряду Q_1 описати сферичну поверхню з радіусом r , то вектор зсуву дорівнює:

$$\vec{D} = \frac{Q_1}{4\pi r^2} \cdot \vec{n}, \quad (3.9)$$

де одиничний вектор $\vec{n}$ перпендикулярний поверхні сфери.

Відповідно до закону Кулона між віддаленими на відстань r точковими зарядами Q_1 і Q_2 у середовищі з діелектричною проникністю $\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$ сила взаємодії дорівнює:

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r}, \quad (3.10)$$

де ε_r – відносна діелектрична проникність середовища;

$$\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м};$$

або

$$\vec{F} = \vec{E} \cdot Q_2,$$

коли E – напруженість електричного поля в точці розташування заряду Q_2 , викликана зарядом Q_1 .

У випадку електродів складної форми для розрахунку поля між ними необхідно представити деяку кількість (систему) одиночних зарядів, розташованих певним чином для виконання умови екіпотенціальності електродів. Окремі заряди в системі називаються еквівалентними. Шукане поле знаходиться шляхом накладання полів від одиничних зарядів.

Для простого випадку у вигляді заземленої сфери і зовнішнього точкового заряду Q (рис. 3.10) електричне поле в довільній точці поза сферою,

наприклад E_x , можна розрахувати, визначивши один зображений усередині сфери еквівалентний заряд Q' .

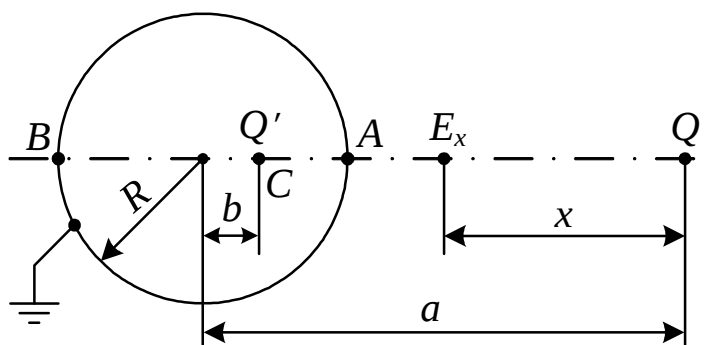


Рис. 3.10

Початкові потенціали в точках A і B поверхні заземленої сфери дорівнюють нулю. Формально це позначає, що для компенсації поля від заряду Q в точках A і B всередині сфери на лінії $A-B$ варто розташувати уявлюваний заряд Q' у деякій точці C , що зміщена від центру сфери на відстані b . Величини Q' і b визначені системою рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_A &= \frac{Q}{4\pi\epsilon(a-R)} + \frac{Q'}{4\pi\epsilon(R-b)} = 0, \\ \varphi_B &= \frac{Q}{4\pi\epsilon(a+R)} + \frac{Q'}{4\pi\epsilon(R+b)} = 0. \end{aligned} \right\}. \quad (3.11)$$

Розв'язання дає:

$$Q' = -\frac{Q \cdot R}{a} \quad \text{и} \quad b = \frac{R^2}{a}. \quad (3.12)$$

Напруженість E_x на продовженні лінії через A і B , тобто коли одиничний вектор $\vec{n}$ збігається з напрямком лінії з'єднання двох зарядів, розраховується як алгебраїчна сума від зарядів Q і Q' за (3.8) з урахуванням (3.9):

$$E_x = \frac{1}{4\pi\epsilon} \left(\frac{Q'}{(a-x-b)^2} + \frac{Q}{x^2} \right).$$

Для системи двох сфер (рис. 3.11) прийом відшукування зображеного заряду (за рис. 3.10) необхідно повторювати. У нульовій ітерації припускаємо,

що в центрі сфери 1 розміщений заряд $Q_0 = 4\pi\epsilon RU$ і $b_0 = 0$, така система електрод-заряд відповідає рис. 3.10. Повернення потенціалів точок поверхні заземленого електрода 2 на нульовий рівень вимагає зображення заряду Q'_0 в точці b'_0 згідно (3.12). Наступна – перша ітерація, передбачає компенсацію викривлення від заряду Q'_0 еквіпотенціальності на рівні сфери 1, для чого в цій сфері зображуємо заряд Q_1 у точці b_1 . Введення заряду Q_1 вимагає зображення в сфері 2 нового заряду (Q'_1, b'_1) для приведення до нуля її потенціалу φ_0 . Кожна наступна ітерація (починаючи з $n = 0$), використовує опис попередньої і для n -тої ітерації маємо:

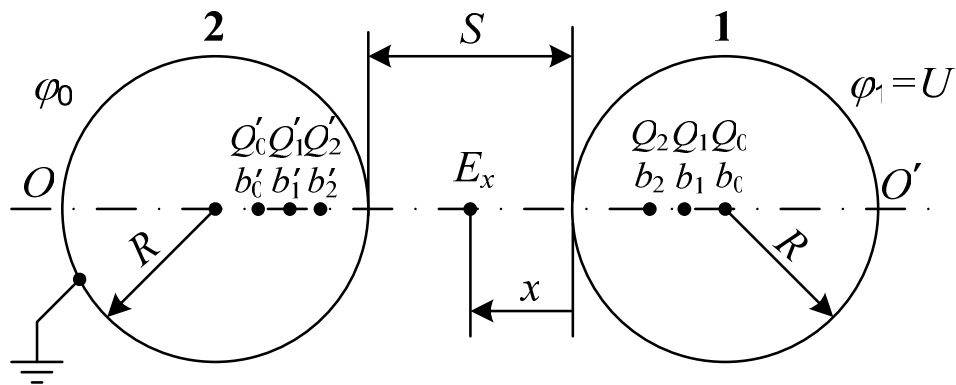


Рис. 3.11

$$\left. \begin{aligned} Q_n &= -Q'_{n-1} \frac{R}{S + 2R - b'_{n-1}}, \\ b_n &= \frac{R^2}{S + 2R - b'_{n-1}}. \end{aligned} \right\}, \quad (3.13)$$

$$\left. \begin{aligned} Q'_n &= -Q_n \frac{R}{S + 2R - b_n}, \\ b'_n &= \frac{R^2}{S + 2R - b_n}. \end{aligned} \right\}. \quad (3.14)$$

Для системи n пар зарядів Q_i і Q'_i напруженість поля на лінії розміщення зарядів $O - O'$ у точці x (рис. 3.11) представляється сумою:

$$E_x = \sum_{i=0}^{i=n} \frac{|Q_i|}{4\pi\epsilon(R - b_i + x)^2} + \sum_{i=0}^{i=n} \frac{|Q'_i|}{4\pi\epsilon(R - b'_i + S - x)^2}. \quad (3.15)$$

Бажаний ступінь відносного наближення Δ розрахованого значення $E_{x\,n}$ граничному $E_{x\,n \rightarrow \infty}$ варто обґрунтувати за виконанням умови обмеження приросту суми на наступній ітерації, а саме

$$\Delta > \frac{E_{x\,n} - E_{x\,n-1}}{E_{x\,n-1}}. \quad (3.16)$$

Відповідно до закону Пашена в області тисків, близьких до атмосферного (відносна щільність $\delta \approx 1$), напруга пробую U_{np} однозначно відповідає певній відстані S_i . Це положення практично використовується в пристрої вимірювання рівня напруги за фактом спостережуваного пробую. Реалізація такого пристрою у вигляді двох взаємно ізольованих сфер однакових радіусів R і передбаченим відліком найкоротшої відстані S_{np} між поверхнями сфер широко використовується в практиці високовольтних вимірювань. За умовою збереження однорідності поля приймають $S_{np\,max} = R$, а для обмеження впливу несферичності поверхні на відлічувану відстань доцільно мати $S_{np\,min} = 0.1R$. В інтервалі $S_{np\,min} < S_{np} < S_{np\,max}$ зв'язок $U_{np} = f(S_{np})$ монотонний і описується градуовальною кривою кульового розрядника.

Розглянемо послідовність розрахунку градуовальної кривої для сфер заданого радіуса R . Задаємося деяким значенням напруги U сфери 1 (рис. 3.11), тобто з урахуванням послідовності наближення присвоюємо напрузі значення U нульової ітерації. У дозволеному інтервалі варіації S_{np} намічаємо ряд значень $S_{np\,i}$, для яких виконуємо в намічених точках поділу проміжку x по довжині розрахунок значення напруженості електричного поля $E_i(x)$. Це дозволяє розрахувати в точках x проміжку ефективний коефіцієнт іонізації α_e , що для повітря у випадку значень електричного поля до 100 кВ/см при тиску до декількох атмосфер із високим ступенем точності визначається за формулою:

$$\alpha_e(x) = 0,2\delta \left(\frac{E(x)}{\delta} - E_{кр} \right)^2, \quad (3.17)$$

де $E_{кр} = 24.5 \text{ кВ/см}$.

При розрахунку $\alpha_e(x)$ за формулою (3.17) одержуємо число актів іонізації на довжині 1 см. Для слабонеоднорідного поля при розвитку самостійного розряду можливо два випадки:

1 – $\frac{E(x)}{\delta} \geq E_{кр}$ уздовж всієї силової лінії електричного поля;

2 – $\frac{E(x)}{\delta} \geq E_{кр}$ на деякій ділянці силової лінії.

Тоді в першому випадку інтегрування по формулі (3.3) необхідно вести уздовж всієї силової лінії, у другому випадку – лише на ділянці, де $\frac{E(x)}{\delta} \geq E_{кр}$.

Таким чином, при $\frac{E(x)}{\delta} \leq E_{кр} - \alpha_e(x) = 0$.

Перевіряємо виконання умови самостійності розряду в проміжку S_{npi} при прийнятій напрузі U на проміжку: при нескінченно малих інтервалах поділу проміжку S_{npi} ця умова записується як (3.6), при цьому, для повітря коефіцієнт $C = 8.2$. З урахуванням отриманого результату шляхом приростів напруги U досягаємо виконання умови:

$$\int_{x=0}^{x=S} \alpha_e(x) dx = 8,2 \pm \Delta, \quad (3.18)$$

причому при використанні масиву $\alpha_e(x)$ інтеграл знаходимо чисельним методом з використанням формули трапецій, а величина Δ вибирається менше 1% від 8.2 за умовою рекомендованого загального значення погрішності виміру розрядником на рівні 3 %.

4. КОРОННИЙ РОЗРЯД

4.1 Коронний розряд і його характеристики

Коронний розряд (корона) – це самостійний розряд, що виникає в різконеоднорідних полях, у яких іонізаційні процеси можуть відбуватися тільки у вузькій області поблизу електродів. У цій області напруженість електричного поля E_m достатня для ударної іонізації (це активна зона, у якій коефіцієнт ударної іонізації $\alpha > 0$). У всьому іншому об'ємі повітря E значно нижча, ніж в активній зоні, тому ударна іонізація тут неможлива. Глибина активної зони біля проводів порядку 1 см.

Коронний розряд є самостійним розрядом, тому що кожна електронна лавина створює в результаті вторинних процесів новий електрон, здатний ініціювати нову лавину електронів.

У *негативного* провода – це бомбардування поверхні провода позитивними іонами (вторинна електронна емісія), фотоемісія, фотоіонізація в об'ємі газу випромінюванням, що виникає при рекомбінації або східчастій фотоіонізації, особливо в газах, молекули яких мають метастабільні рівні збудження. У *позитивного* провода нові електрони створюються в результаті фотоіонізації газу та розпаду негативних іонів.

Початкова напруженість електричного поля E_n , що відповідає появі корони, залежить від радіуса кривизни електрода, роду газу, його відносної щільності та ряду інших факторів.

До полів такого роду відноситься і електричне поле проводів повітряних ліній електропередачі.

Початкова напруженість електричного поля E_n , що відповідає появі загальної корони на одиночному проводу з радіусом r_0 при постійній та змінній напрузі (амплітудне значення) визначається за формулою:

$$E_n = 24.5m\delta \left(1 + \frac{0.613}{(r_0\delta)^{0.4}} \right), \text{ кВ/см} \quad (4.1)$$

у якій r_0 – радіус провода, см; m – коефіцієнт гладкості провода (для добре відполірованого круглого провода $m=1$), δ – відносна щільність повітря.

Проводи ліній електропередачі звиті з великої кількості окремих дротів і тому мають не гладку поверхню (рис. 4.1), внаслідок чого напруженість поля в різних точках поверхні неоднакова. Так як коронний розряд насамперед виникає на виступаючих частинах провода (у точках a), де напруженість перевищує середню, то початкова напруженість поля для витого проводу менше, ніж для гладкого проводу того ж радіуса.

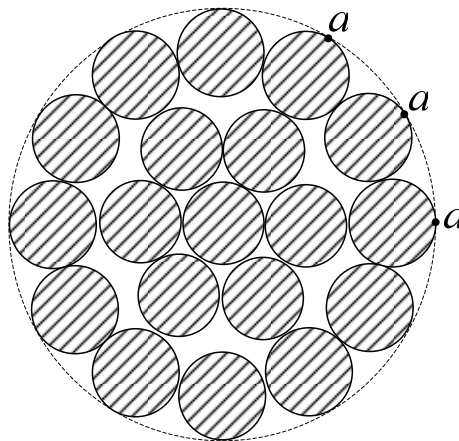


Рис. 4.1. Багатодрововий провід повітряної лінії

Такий провід створює за рахунок верхнього повива із числом жилок n_0 нерівномірний розподіл заряду по поверхні кожної жилки, що зв'язано, по-перше, зі збільшенням максимальної напруженості в периферійних точках провода (рис. 4.2) в 1.35-1.4 рази й, по-друге, зі значно більш швидким спадом напруженості електричного поля поблизу поверхні провода, ніж у звичайного провода, що утрудняє перехід несамоствійного розряду до самоствійного: для такого переходу потрібно більша в 1.2-1.25 рази напруженість E_m на поверхні провода, ніж для провода із гладкою поверхнею.

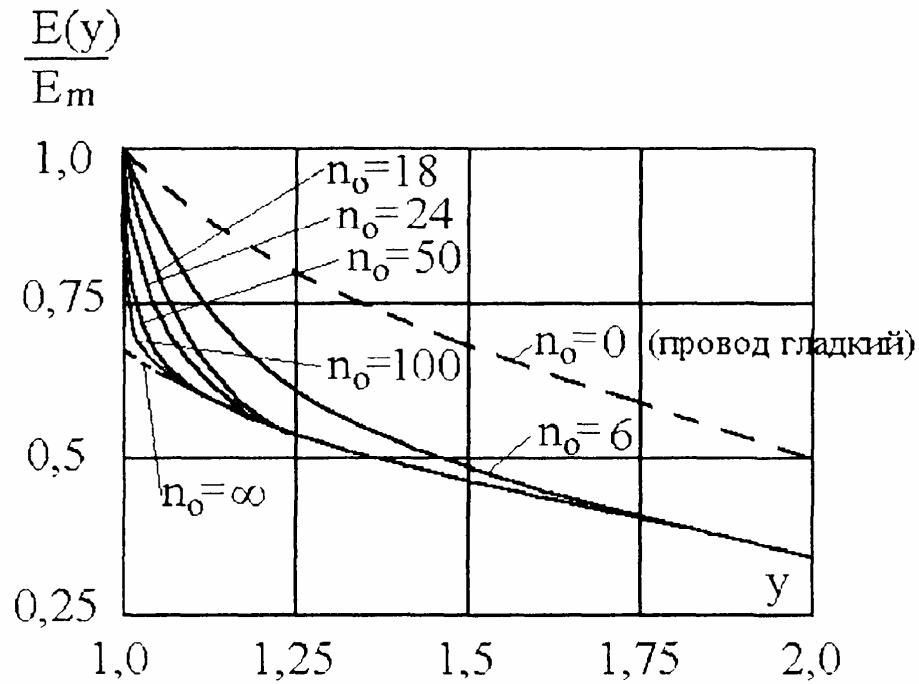


Рис. 4.2. Розподіл електричного поля поблизу витого провoda залежно від відносної відстані $y = r/r_0$

У підсумку коефіцієнт гладкості m для кручених провідів із числом жилок від 14 до 24 у верхньому повиві дорівнює приблизно $1.2:1.4 = 0.85$. Для провідів різних марок коефіцієнт гладкості приймає значення $m = 0.82 - 0.94$.

При коронному розряді відбувається іонізація повітря й біля поверхні провoda утвориться об'ємний заряд того ж знака, що й полярність напруги на провіді.

Напруженість поля біля поверхні провoda під час коронування залишається такою, що дорівнює E_n . Збільшення напруги на провіді призводить до посилення іонізаційних процесів, росту об'ємного заряду та зниженню напруженості до E_n .

Внаслідок збільшення об'ємного заряду втрати енергії на корону ростуть тим більше, чим більше напруга на провіді перевершує початкову напругу корони:

$$U_n = E_n r \ln \frac{2H}{r}, \quad (4.2)$$

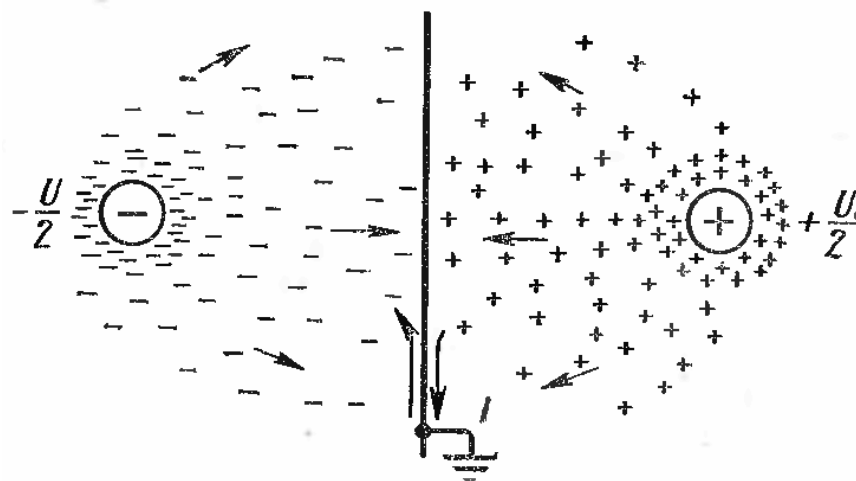
де H – висота одиночного проводу над землею.

Так як об'ємний заряд при будь-якій полярності проводу переміщається від проводу до землі, напруженість поля біля поверхні проводу прагне збільшитися. Однак через посилення при цьому іонізації повітря об'ємний заряд поблизу проводу поповнюється і напруженість поля в підсумку зберігається рівною E_n . Таким чином, внаслідок безперервного видалення об'ємного заряду від проводу коронний розряд може підтримуватися необмежено довго.

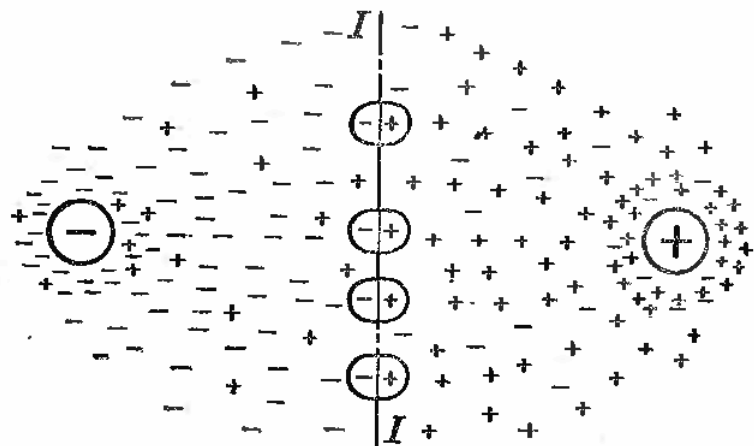
Під дією сил електричного поля іони, що складають об'ємний заряд, рухаються, створюючи струм у проміжку між коронуючим проводом і землею. Для їхнього переміщення необхідні витрати енергії, які й визначають в основному втрати енергії на корону, оскільки втрати енергії на іонізацію повітря значно менші.

На постійній напрузі розрізняють *уніполярну* та *біполярну* корону. Якщо коронує один провід – утворюється уніполярна корона. При *уніполярній* короні згенеровані короною заряди, що мають той же знак, що й коронуючий провід, під дією електричного поля спрямовуються до землі, де відбувається їхня нейтралізація (наприклад, проміжок провід – площа рис. 4.3а). При *біполярній* короні об'ємні заряди проводів різної полярності рухаються назустріч один одному (рис. 4.3б). При зустрічі відбувається часткова рекомбінація іонів різних знаків. Значна частина іонів проникає в простір поблизу протилежного проводу, що призводить до посилення в цій частині електричного поля. У результаті цього інтенсивність іонізації зростає, струм корони, а отже, і втрати енергії збільшуються.

На змінній напрузі коронний розряд запалюється при досягненні початкової напруги, що дорівнює напрузі запалювання корони U_n при часі t_1 (рис. 4.4а). Навколо проводу утворюється зона іонізації, яка називається чохлом корони (рис. 4.4в). Із чохла корони позитивні заряди (рис. 4.4в) виносяться в навколишній простір і утворюють зовнішній об'ємний заряд (ОЗ). Процес коронування триває до тих пір, поки напруга не досягне $U_{\max}$ при t_2 .



a



б

Рис. 4.3. Розподіл об'ємного заряду уніполярної (а) і біполярної (б) корони

Незважаючи на підвищення напруги до $U_{\max}$, напруженість на проводі залишається постійною та такою, що дорівнює E_n через вплив об'ємного заряду. Потім напруга починає знижуватися. Синхронно знижується й напруженість на проводі, що призводить до загасання корони. Але після загасання корони (після t_2) у просторі навколо провода залишається позитивним зовнішній об'ємний заряд, що ще віддаляється від провода (рис. 4.4б).

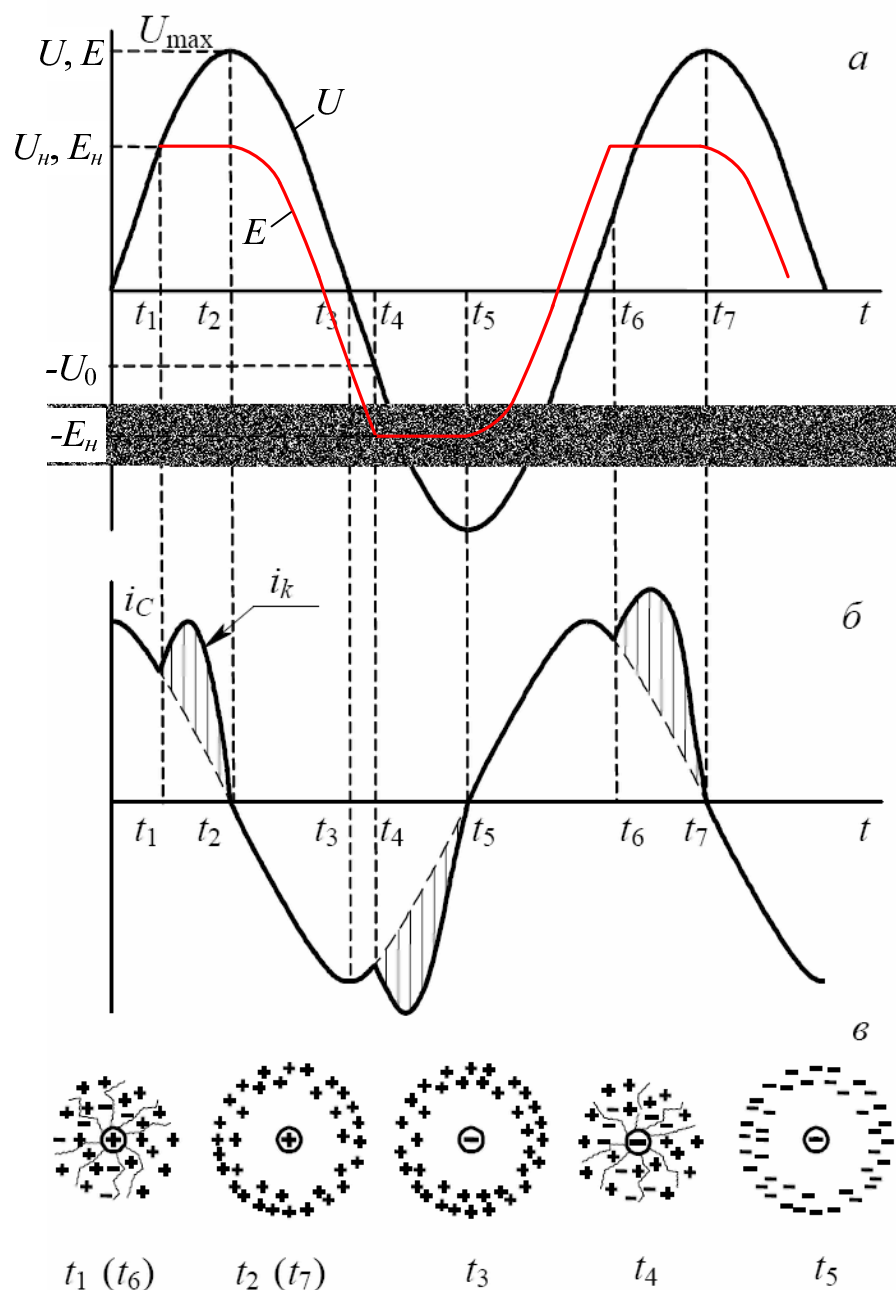


Рис. 4.4. Розвиток корони при змінній напрузі

Відстань, на яку віддаляється об'ємний заряд, залежить від напруги на проводі та становить $\sim 40\text{--}100$ см. Різниця потенціалів між проводом і ОЗ збільшується зі зменшенням напруженості на проводі до часу t_3 . При t_4 (рис. 4.4а,в), коли напруга досягає U_0 , що значно менше U_H , запалюється негативна корона. При цьому негативно заряджені частинки починають рухатися від проводу в зовнішню область, а назустріч (до проводу) рухаються позитивно заряджені частинки із зовнішнього об'ємного заряду. Відбувається

рекомбінація заряджених частинок до повної компенсації позитивного зовнішнього ОЗ. Потім накопичується негативний ОЗ у зовнішній області. Все це відбувається за час від t_4 до t_5 (рис. 4.4а,в). У момент часу t_5 (початок зменшення напруги) негативна корона гасне. Надалі всі ці цикли повторюються і запалювання корони на обох полярностях відбувається при U_0 .

Між проводам і землею має місце ємність C , що заряджається й розряджається із частотою змінного струму. При цьому між проводом і землею протікає ємнісний струм i (рис. 4.4б):

$$i_C = C \frac{du_C}{dt}.$$

Виникнення коронного розряду в момент t_1 призводить до появи струму корони i_k , що накладається на ємнісний струм лінії та спотворює синусоїду струму (рис. 4.4б). Тривалість піків струму корони дорівнює тривалості її горіння, тобто від t_1 до t_2 (або $t_4 - t_5$, $t_6 - t_7$).

При змінній напрузі коронування проводів більш інтенсивне, ніж при постійній напрузі, і за інших рівних умов втрати енергії на корону істотно більше.

Для того щоб виключити втрати енергії на корону, а також зменшити і радіоперешкоди, початкова напруга корони повинна бути не нижче найбільшої робочої напруги лінії щодо землі. Забезпечити це співвідношення належним вибором діаметра проводів можна тільки для умов сухої погоди. При атмосферних опадах виключити коронування проводів неможливо.

Оскільки суха погода на території України становить 70...90 % річного часу (6000 – 8000 год. з 8760 год.), то діаметр проводів вибирають із умови виключення корони в гарну погоду.

На основі попередніх розрахунків встановлено, що для ліній електропередачі напругою 110 і 220 кВ найменші діаметри проводів, при яких

виключається корона в гарну погоду, складають відповідно 1.2 і 2.4 см (при нормальних атмосферних умовах).

При номінальних напругах 330 кВ і вище потрібні проводи ще більшого діаметру, які у багатьох випадках перевищують діаметр, обраний за умови передачі по лінії заданої потужності. У таких випадках доцільно мати проводи, площа поперечного перерізу яких по провідному матеріалу та діаметру незалежні. Це так звані розширені проводи (рис. 4.5). Вони мають діаметр, при якому забезпечується необхідне зниження напруженості поля на їхній поверхні, а для скорочення площі поперечного перерізу робляться порожніми або зі склопластиковою серцевиною.

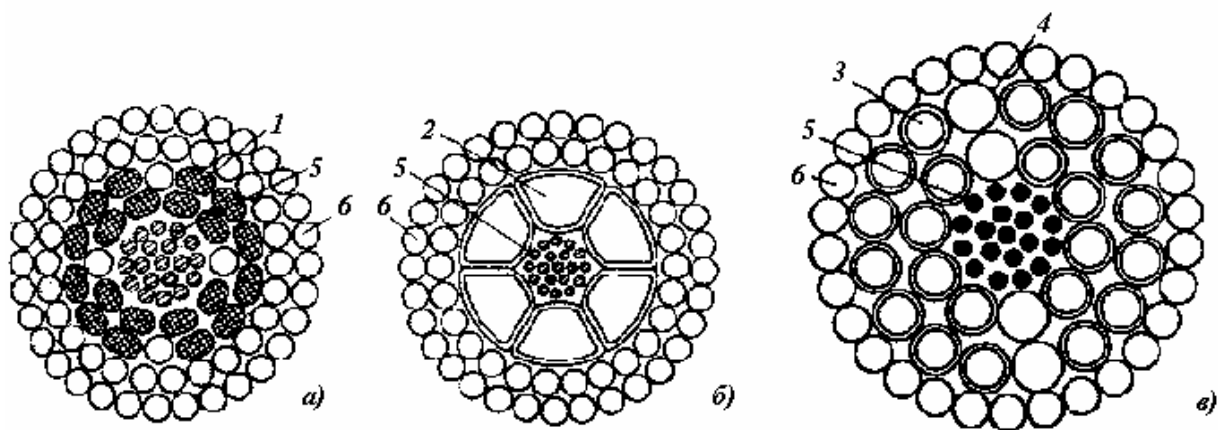


Рис. 4.5. Конструкції сталевалюмінієвих розширених проводів:

- а* – з паперовим заповненням 1; *б* – із секторними алюмінієвими трубками 2;
в – з алюмінієвими трубками 3 і броньованим повивом із двох алюмінієвих дротів 4; 5 – сталеві дроти сердечника; 6 – алюмінієві дроти

Інше рішення, що одержало в цей час широке поширення, було запропоновано ще в 1910 р. акад. В. Ф. Миткевичем і полягає в застосуванні розщеплених проводів фаз (рис. 4.6). У цьому випадку кожна фаза лінії складається замість одного провода великого діаметра з декількох паралельних проводів відносно малого діаметра.

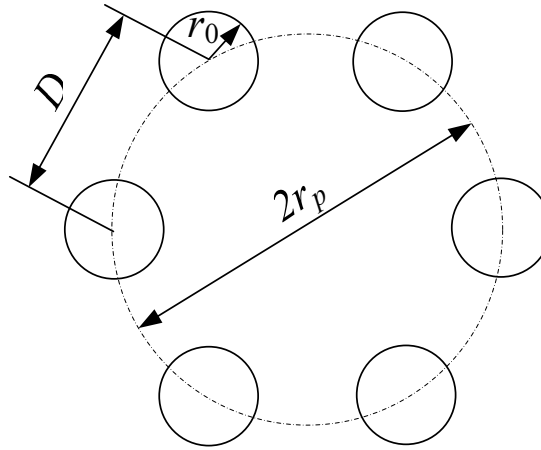


Рис. 4.6. Характеристики розщепленої фази

У такій конструкції фази вдається при необхідному сумарному перетині проводів істотно зменшити максимальну напруженість поля на їхній поверхні. Вирішальним є те, що заряд кожного проводу q_0 становить тільки частину загального заряду розщепленої фази

$$q_0 = q_\phi / n = C_{p.\phi} \cdot U_\phi / n, \quad (4.3)$$

де n – число проводів у фазі;

$C_{p.\phi}$ – ємність одиниці довжини розщепленої фази;

U_ϕ – фазна напруга.

Якщо проводи розташовуються на рівних відстанях по окружності радіусом r_p , що називається радіусом розщеплення (рис. 4.6), то в трифазній системі ємність розщепленої фази визначається як

$$C_{p.\phi} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{S}{r_e}}, \quad (4.4)$$

де S – середньгеометрична відстань між фазами;

$r_e = \sqrt[n]{nr_0 r_p^{n-1}}$ – еквівалентний радіус одиночного проводу, що має ту ж

ємність, що й розщеплена фаза.

Середня робоча напруженість електричного поля на поверхні проводів розщепленої фази з урахуванням (4.3) та (4.4) визначається як

$$E_{cp} = \frac{q_0}{2\pi\epsilon_0 r_0} = \frac{U_\phi}{nr_0 \ln \frac{S}{r_e}}, \quad (4.5)$$

а максимальна як

$$E_{max} = K_y E_{cp}, \quad (4.6)$$

де $K_y = 1 + (n-1)\frac{r_0}{r_p}$ – коефіцієнт, що враховує посилення напруженості поля внаслідок впливу зарядів на сусідніх проводах розщепленої фази.

Найбільш істотний вплив на максимальну напруженість електричного поля становить радіус розщеплення r_p (рис. 4.6), що пов'язаний з D і n наступною формулою: $R = D/2\sin(\pi/n)$.

При збільшенні r_p , з одного боку, зменшується вплив зарядів сусідніх проводів, а з іншого боку, збільшується ємність фази й відповідно її заряд. Тому існує оптимальний радіус розщеплення, при якому E_{max} найменша (рис. 4.7).

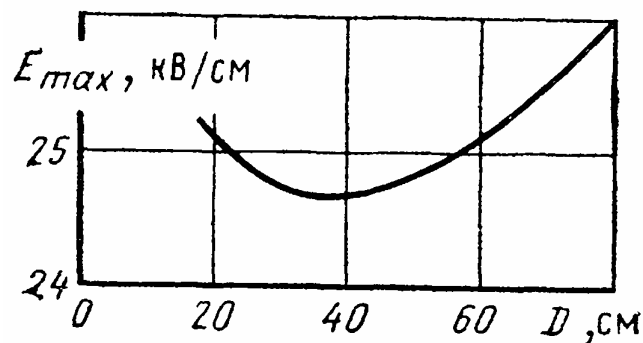


Рис. 4.7. Залежність максимальної напруженості електричного поля на проводах розщепленої фази від відстані між проводами ПЛ 500 кВ ($n = 3$, провода АСО 500)

Збільшенням діаметру проводів і зниженням напруженості поля на їхній поверхні не можна виключити коронного розряду при несприятливих атмосферних умовах. Більше того, навіть при гарній погоді не може бути виключена корона, наприклад, у місцях ушкодження поверхні проводу та арматури гірлянд, на елементах кріплення, тобто в точках місцевого посилення поля. Таку корону називають місцевою на відміну від загальної корони, що існує на всій поверхні проводів при $E > E_n$.

Оскільки річні втрати енергії на корону становлять помітне значення та можуть досягати 40% від втрат на нагрівання проводів, вони впливають на техніко-економічні характеристики лінії електропередачі і їх необхідно враховувати.

Оцінка втрат енергії на корону здійснюється на основі експериментально отриманих даних. Існує кілька методів розрахунку втрат на місцеву корону. В одному зі способів, розроблених у ВНДІЕ, використовуються узагальнені характеристики втрат для різних погодних умов. Виділяються чотири групи погоди: *гарна погода* (без опадів); *сухий сніг*; *дощ і мокрий сніг*; *паморозь, ожеледь і іній*. Для траси лінії електропередачі визначаються за метеорологічним даними тривалості окремих видів погоди в годинах: гарної погоди $h_{г.н}$, снігу h_c , дощу h_d , паморозі h_n (табл. 4.1). Потім по відношенню E_{max}/E_n із кривих (рис. 4.8) знаходять питомі втрати потужності для різних погодних умов, а потім середньорічні втрати енергії на корону.

Таблиця 4.1 – Тривалість усереднених характеристик погоди

Група	Річна тривалість		Річні втрати енергії при даній погоді, % загальних втрат
	τ	%	
Гарна погода	7120	81,3	30
Сухий сніг	800	9,1	8
Дощ	500	5,7	22
Паморозь	340	3,9	40
<i>Сума</i>	<i>8760</i>	<i>100</i>	

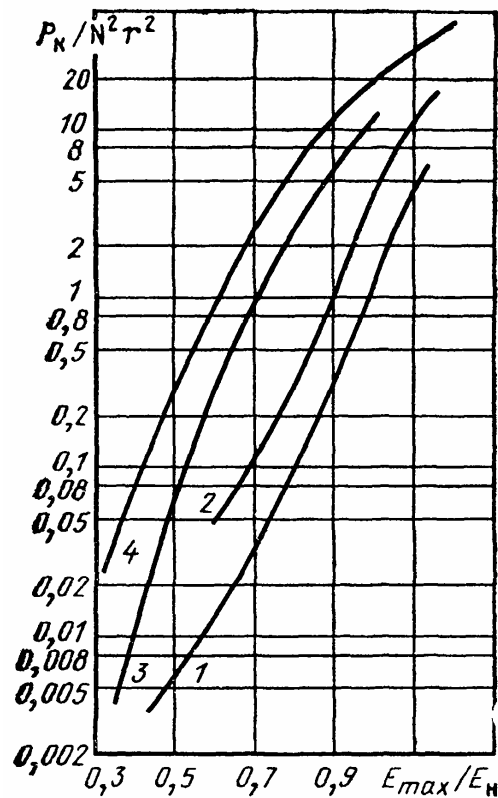


Рис. 4.8. Узагальнені характеристики втрат потужності на корону:

1 – гарна погода; 2 – сніг; 3 – дощ; 4 – паморозь

Річні втрати енергії на корону, $\kappa Bm \cdot год/км$, визначаються як

$$P_k = n^2 r^2 (P_{z.n} \cdot h_{z.n} + P_o \cdot h_o + P_c \cdot h_c + P_n \cdot h_n), \quad (4.7)$$

де n – загальне число проводів у трьох фазах лінії;

r – радіус проводів;

$P_{z.n}, P_o, P_c, P_n$ – питомі втрати на корону при різних видах погоди.

Середньорічна потужність втрат на корону, $\kappa Bm/км$, дорівнює:

$$P_{c.p} = P_k / 8760. \quad (4.8)$$

В оцінних розрахунках втрат енергії на корону початкова напруженість

для розщеплених проводів визначається по (4.1), а максимальна робоча – по (4.5) та (4.6). Для одиночних проводів фаз початкова напруженість корони визначається по (4.1), а робоча напруженість електричного поля – по (4.5) при $n = 1$ і $r_e = r_0$. Напруженості розраховуються в амплітудних значеннях.

У техніко-економічних розрахунках рекомендується враховувати втрати на корону, якщо $E_{\max}/E_H > 0.5$. Економічно прийнятні втрати потужності на корону мають місце при

$$E_{\max}/E_H \leq 0.9, \quad (4.9)$$

і це співвідношення є визначальним при виборі проводів ліній електропередачі за умовою обмеження втрат на корону.

5. ЕЛЕКТРИЧНІ РОЗРЯДИ В РІДКИХ ДІЕЛЕКТРИКАХ

Рідкі діелектрики, володіючи значно більш високою електричною міцністю (у порівнянні з газами), знайшли дуже широке застосування як високовольтна ізоляція в різноманітних пристроях: трансформаторах, кабелях, лініях передач, конденсаторах, вимикачах, розрядниках і т.д.

Рідкі діелектрики можна класифікувати по їхній природі на наступні групи:

- 1) вуглеводні мінеральні – продукти перегону нафти й кам'яного вугілля (трансформаторне, конденсаторне й ін. масла);
- 2) вуглеводні рослинні (касторове, лляне й ін. масла);
- 3) хлоровані вуглеводні ароматичного ряду (хлордифеніл, совтол);
- 4) кремнійорганічні сполуки.

Крім цього, рідкі діелектрики можуть бути полярними й неполярними. У зв'язку із цим у них істотно змінюються властивості, які наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Властивості діелектриків

Вид діелектрика	$\rho, \text{Ом}\cdot\text{см}$	ϵ	$\text{tg}\delta$
Неполярні	$\geq 10^{18}$	1,8 – 2,5	$\approx 0,001$
Слабополярні	$\approx 10^{11} - 10^{12}$	$\geq 2,5$	$\approx 0,01$
Сильнополярні	$\approx 10^7 - 10^8$	≥ 5	$\approx 0,1$

У промисловості мають справу з технічно чистими рідкими діелектриками, у яких вплив сторонніх домішок обмежено деякою мінімальною концентрацією. У цьому зв'язку в теоріях пробою технічно чистих рідин розглядають вплив сторонніх домішок, що неминуче з'являються при експлуатації. Найважливіші сторонні домішки в рідких діелектриках:

- а) вода;
- б) гази;
- в) волокна целюлози;

г) вуглець;

д) продукти розкладання використовуваного рідкого діелектрика.

У порівнянні з повітрям (газом), пробивні напруги масла мають дуже великий розкид. Відхилення від середнього становить 50 % і більше, а середньоквадратичне відхилення – 10...15 %.

Визначення електричної міцності масла $U_{\text{пр}}$ за ДСТ 6581-75 здійснюється в стандартному пробійнику на змінній напрузі. На пробій рідких діелектриків істотний вплив становить безліч факторів, які можуть, як знижувати пробивну напругу (забруднення, зволоження й ін.), так і збільшувати його (очищення, тиск, бар'єри й т.д.). Основні фактори, що змінюють $U_{\text{пр}}$:

1) забруднення й зволоження (збільшення забруднення масла знижує $U_{\text{пр}}$, незначна кількість води (<0,03%) різко знижує $U_{\text{пр}}$);

2) в'язкість (зменшення в'язкості зменшує $U_{\text{пр}}$);

3) температура (зі збільшенням температури $U_{\text{пр}}$ зменшується; на імпульсній напрузі цей вплив незначний; для технічно чистого масла залежність $U_{\text{пр}} = f(T^{\circ}\text{C})$ носить складний характер);

4) тиск (для технічно чистого масла збільшення тиску приводить до збільшення $U_{\text{пр}}$, тому що збільшується тиск у газових пухирцях);

5) наявність бар'єрів (бар'єри можуть істотно підвищити $U_{\text{пр}}$), особливо в різконеоднорідному полі;

6) час дії напруги (зі збільшенням часу впливу напруги $U_{\text{пр}}$ зменшується; чим чистіше діелектрик, тим менше цей вплив; на імпульсній напрузі коефіцієнт імпульсу в кілька разів більше, ніж для газових діелектриків);

7) форма, площа електродів і відстань між ними (форма електродів створює поля різного ступеня неоднорідності при $S = \text{const}$; чим більше коефіцієнт неоднорідності, тим нижче $U_{\text{пр}}$; зі збільшенням площі електродів $U_{\text{пр}}$ зменшується; збільшення відстані збільшує $U_{\text{пр}}$);

8) полярність електродів при несиметричній їхній формі (при негативній

полярності пробивні напруги більше, ніж при позитивній; цей ефект тим більше, чим більше полярний діелектрик). Пробій рідких діелектриків – явище складне, що пояснюється складною сполукою рідких діелектриків і багатьма факторами, що впливають на розвиток пробою (забруднення, форма, розміри й матеріал електродів, температура, тиск і ін.) Для добре очищених рідин величина електричної міцності досягає 1000 кВ/см.

У табл. 5.2, дані електрофізичні характеристики деяких найбільш широко застосовуваних в енергетиці технічно чистих рідких діелектриків при нормальних умовах навколишнього середовища.

Таблиця 5.2 – Електричні характеристики рідких діелектриків

Діелектрик	E_{np} , кВ/см (U_{np} , кВ)	ε	$tg \delta$	Об'ємний опір. ρ Ом·см	Температура замерзання $T_{зам}$, °C
Трансформаторне масло марка ТАп ТУ 38-101-281-80	280 (70)	2,3	0,215	$5 \cdot 10^{10}$	-45
Трансформаторне масло марка Т-750	300 (75)	2,25	0.056	10^{11}	-55
Трансформаторне масло марка Тк ТУ 38-401-358-84	320 (80)	2,2	0,004	10^{12}	-45
Конденсаторне масло ДСТ 5775-68	200	2,1...2,3	0,005	10^{12}	-45
Кабельне масло МН-4	180	2,2	0,003	10^{11}	-45
Совол-10	220	4,3	0,03	10^{12}	-6
Трихлордифеніл	200	5,9	0,015	$3 \cdot 10^9$	-18
Кремнийорганічне масло типу ПМС-10	(35)	2,6....2,7	0,0002	$2 \cdot 10^{12}$	-65
Кремнийорганічне масло типу ПЕС-3	(45)	2,4	0,0003	10^{11}	-70
Фторуглеводневі рідини типу Хладон-12	(32)	2,52	0.0002	10^{12}	-
Касторове масло	150	4...4,5	0,01...0,03	-	-15

5.1 Вплив вологи та мікродомішок

Волога в маслі може перебувати в трьох станах: у молекулярно-розчиненому вигляді, у вигляді емульсії (дрібні кульки води розміром 2...10 мкм) і у вигляді водяного відстою на дні бака. Розчинність води в рідких діелектриках залежить від температури. Наприклад, у мінеральному маслі при 20°C може розчинятися $\sim 40 \cdot 10^{-6}$ води по об'ємі, а при 80°C $\sim 400 \cdot 10^{-6}$.

Наявність вологи в обох станах позначається на електричній міцності масла, особливо в присутності волокон, причому найбільш сильно впливає емульгована волога. Внаслідок великої діелектричної проникності (для води $\epsilon = 80$, для волокон целюлози $\epsilon = 6,4$) часточки вологи й волокна втягуються в область найбільшої напруженості електричного поля, поляризуються й витягаються уздовж силових ліній поля. Це приводить до утворення «містків», які збільшують локальну щільність струму, до нагрівання, сильному збільшенню місцевої напруженості поля в місцях розриву містків, внаслідок чого починаються місцеві іонізаційні процеси й може відбутися пробій усього міжелектродного проміжку.

Залежність пробивної напруженості трансформаторного масла від вмісту вологи C_{H_2O} (рис. 5.1) (мільйонні долі вологи в одиниці об'єму масла) показує, що наявність 40 – 50 мільйонних часток вологи зменшує електричну міцність масла приблизно в 10 раз.

Зниження електричної міцності в області малих концентрацій викликано впливом розчиненої вологи, а в області більших концентрацій – емульгової вологи.

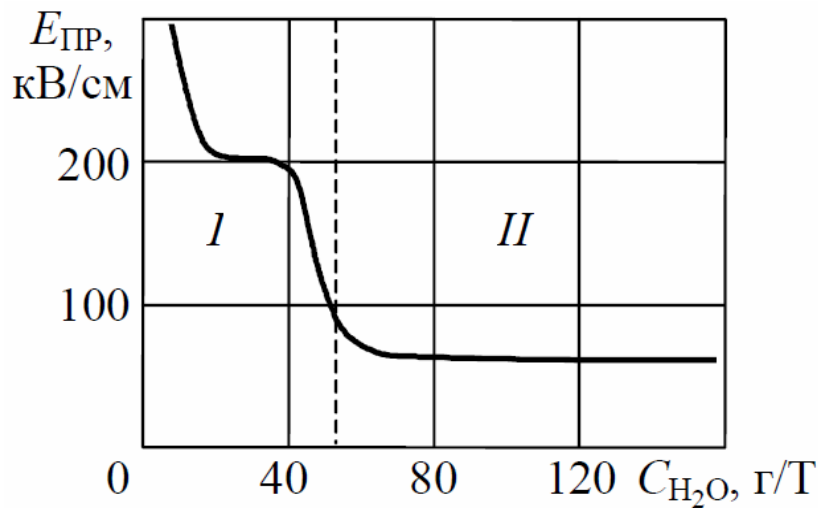


Рис. 5.1. Залежність електричної міцності трансформаторного масла від вмісту води, C_{H_2O} (грам/тонна):

I – зона розчинності води, *II* – емульгована вода

Наявність води й волокон слабо позначається на міцності рідких діелектриків при коротких імпульсах напруги (одиниці-десятки мікросекунд), оскільки частки домішок не встигають переміститися на значну відстань і вплинути на розвиток розряду в рідині.

Загальна кількість води, що може перебувати в маслі в молекулярно-розчиненому й емульсійному вигляді, обмежена. При вмісті води більше 0,02 % вода випадає у вигляді відстою на дно. Хоча сам відстій і не впливає на електричну міцність, його поява свідчить про істотне погіршення ізоляційних властивостей масел.

Особливо різке зменшення розрядних напруг відбувається при наявності в маслі гігроскопічних забруднень у вигляді волокон паперу, картону, пряжі, що значно полегшують утворення провідних містків. Ці забруднення проникають у масло в процесі експлуатації з елементів твердої ізоляції, що перебувають у маслі.

5.2. Вплив тиску

Пробивна напруга як технічних, так і очищених рідких діелектриків при промисловій частоті 50 Гц сильно залежить від тиску. Це пов'язано з наявністю та утворенням у рідині при високій напрузі пухирців газу, що є вогнищами розвитку пробою. А електрична міцність газу сильно залежить від тиску (закон Пашена).

На рис. 5.2 представлені залежності пробивної напруги трансформаторного масла від тиску нижче атмосферного. При знижених тисках з масла починають виділятися розчинені в ньому гази і його міцність різко падає (рис. 5.2, крива 1).

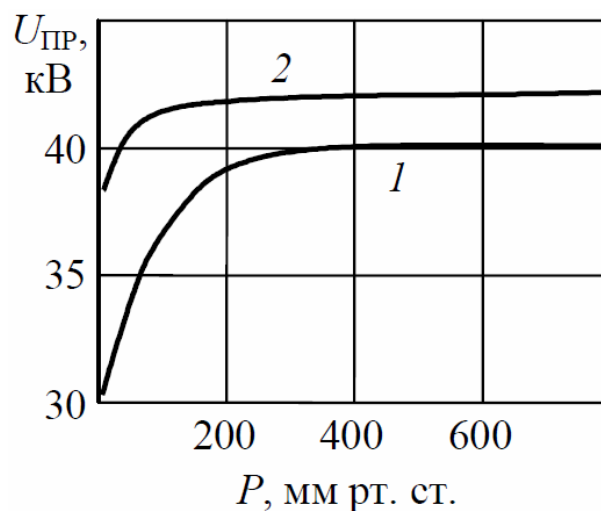


Рис. 5.2. Залежність пробивної напруги трансформаторного масла від тиску:

1 – недегазоване масло; 2 – дегазоване масло

Видно, що залежність пробивної напруги від тиску помітно збільшується з підвищенням ступеня очищення масла (рис. 5.2., крива 2), що вказує на великий вплив газоподібних домішок. При тисках вище атмосферного (див. рис. 5.3.) електрична міцність масла збільшується, що також свідчить про наявність газу в маслі і його впливі на електричну міцність масла.

При імпульсних впливах тиск менше позначається на електричній міцності рідких діелектриків.

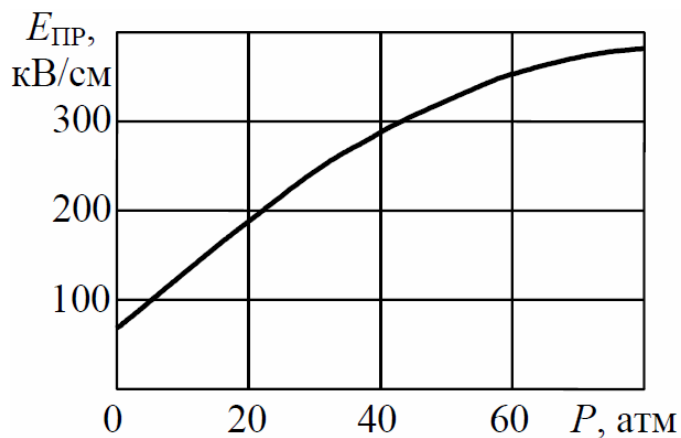


Рис. 5.3. Залежність пробивної напруги парафінового масла від тиску (50 Гц)

5.3. Вплив температури

Електрична міцність рідких діелектриків у сильному ступені залежить від їхньої чистоти. Для чистих сухих рідин значний вплив температури спостерігається в області інтенсивного випару та кипіння (рис. 5.4, крива 1).

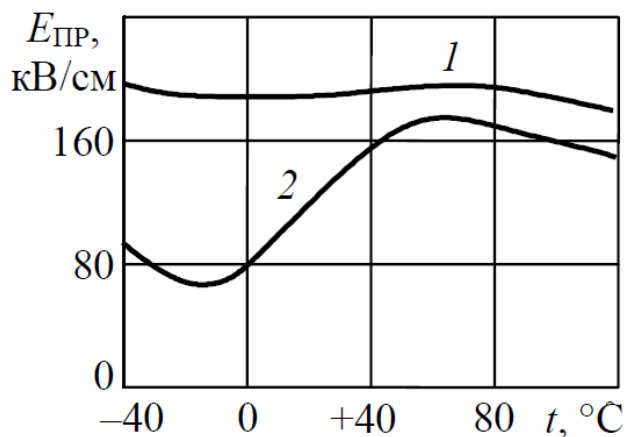


Рис. 5.4. Залежність електричної міцності трансформаторного масла від температури:

1 – сухе масло; 2 – технічне мастило з домішкою води

Для технічно чистих рідин з домішками води залежність електричної міцності від температури досить складна. З рис. 5.4. (крива 3) видно, що має

місце мінімум і максимум електричної міцності. Зниження температури від точки максимуму приводить до зменшення $E_{\text{пр}}$ до мінімуму, що пов'язано з переходом розчиненої води в емульгований стан. Подальше зниження температури (менше 0°C) викликає замерзання крапельок води і, як наслідок, підвищення $E_{\text{пр}}$. У льоду діелектрична постійна $\epsilon_{\text{л}}$ приблизно дорівнює діелектричній сталій масла $\epsilon_{\text{м}}$ ($\epsilon_{\text{л}} \approx \epsilon_{\text{м}}$), що зменшує вплив води на електричну міцність масла.

Зменшення електричної міцності для сухого й технічного мастил при температурі вище $+80^{\circ}\text{C}$ (див. рис. 5.4.) обумовлено інтенсивним випаром і кипінням рідини.

5.4. Вплив часу дії напруги

Електрична міцність рідких діелектриків істотно залежить від тривалості прикладення напруги τ . Чим більше домішок у рідині (особливо води й волокон), тим сильніше ця залежність (рис. 5.5).

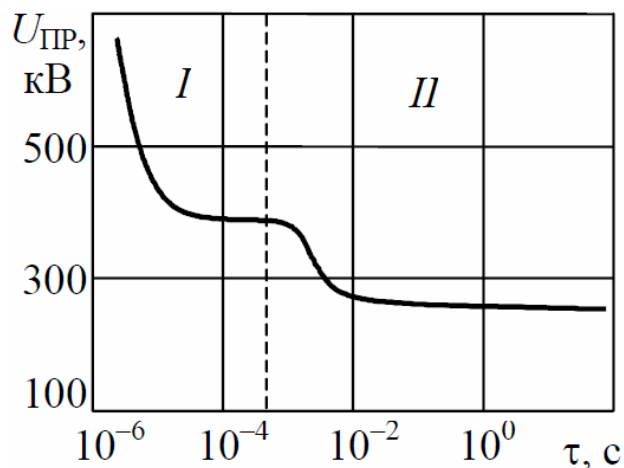


Рис. 5.5. Залежність пробивної напруги від часу впливу для трансформаторного масла. Електроди вістря-площина; відстань між електродами 20 см; позитивна полярність напруги

Експериментальні результати по пробою рідких діелектриків показують наявність, як мінімум, двох областей, пов'язаних із часом впливу напруги

(рис. 5.5.), поява яких пояснюється різними механізмами пробою. При впливі імпульсів напруги із тривалістю $\tau < 10^{-4} \text{ с}$ (рис. 5.5., область I) вплив домішок значно ослаблено, тобто вони не встигають переміститися на помітні відстані. Початкова стадія розряду в рідині виникає при напруженостях 100 кВ/см. У цьому випадку починають проявлятися процеси електронної емісії. Можливі процеси авто – і термоелектронної емісії з катода, а також процеси автоіонізації рідини біля анода. Всі перераховані явища можуть брати участь в ініціюванні розряду.

Утворення газових пухирців біля електрода може мати місце як за рахунок розкладання вуглеводнів рідкого діелектрика, так і за рахунок закипання рідини під впливом виділеної енергії в локальних зонах електрода (теплова теорія пробою). У газових пухирцях розвивається ударна іонізація, утвориться кистьовий стрімерний канал, що розвивається до протилежного електрода.

Різде збільшення електричної міцності при $\tau < 10^{-5} \text{ с}$ пов'язане із запізнюванням розвитку розряду, коли час впливу напруги стає сумірним із часом формування розряду. Збільшення часу впливу напруги $\tau < 10^{-3} \text{ с}$ приводить до швидкого зниження $U_{пр}$ внаслідок впливу вологи й волокон, а також утворення газових пухирців. При подальшому збільшенні часу впливу напруги вирішальний вплив на зниження $U_{пр}$ починають чинити теплові процеси.

При тривалому впливі напруги (див. рис. 5.5, область II) присутність вологи, газу, забруднень у рідкому діелектрику сильно знижує його електричну міцність, причому найнебезпечнішим є емульговане стояння вологи. Пробій настає внаслідок утворення ланцюжків із дрібних поляризованих часток включень, які витягаються уздовж силових ліній. Ці ланцюжки утворюють провідний канал, по якому протікає струм, що розігріває воду та прилягаючу до каналу рідину до кипіння. Пробій рідини відбувається по газовому каналу, що утворився.

5.5 Вплив геометрії електродів, відстані між ними, матеріалу та полярності на пробивну напругу

Геометрична форма електродів створює поля різного ступеня неоднорідності, і чим більше коефіцієнт неоднорідності, тим нижче пробивна напруга. Навіть незначне збільшення радіуса кривизни електродів у різко неоднорідних полях дає більше істотне збільшення $U_{пр}$ в порівнянні з повітрям. Збільшення відстані між електродами S приводить до збільшення пробивної напруги (див. рис. 5.6.).

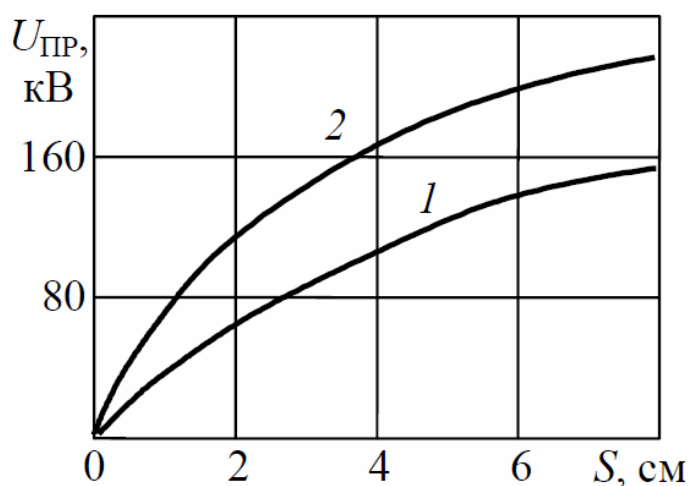


Рис. 5.6. Залежність пробивної напруги від відстані між електродами й полярності для трансформаторного масла (електроди вістря-площина; напруга постійна):

1 – позитивна полярність вістря;

2 – негативна полярність вістря

На величину пробивної напруги при незмінному S впливає площа електродів і об'єм рідини між електродами: збільшення площі електродів і об'єму рідини викликає зниження $U_{пр}$. Стан поверхні електродів також впливає на електричну міцність $E_{пр}$ рідких діелектриків. Забруднення, окислювання й погане полірування поверхні електродів знижують $E_{пр}$. У міру збільшення

відстані між електродами вплив матеріалу електродів зменшується й при відстані кілька міліметрів практично припиняється. Вплив матеріалу електродів на $E_{\text{пр}}$ рідких діелектриків здійснюється через емісію електронів з катода.

Як слідує з рис. 5.6, пробивна напруга залежить від полярності *електрода-вістря* при несиметричній системі електродів. Найбільше яскраво ця залежність проявляється для полярних рідин. Наприклад, для води $U_{\text{пр}}$ при негативній полярності вістря пробивна напруга збільшується в 2,0–2,5 рази в порівнянні з позитивною полярністю.

5.6 Бар'єрний ефект

Бар'єри із твердого ізоляційного матеріалу, що встановлюються в маслі між електродами, досить широко застосовуються для підвищення електричної міцності масляної ізоляції.

При наявності бар'єрів електрична міцність розрядного проміжку значно зростає. Це обумовлюється двома факторами. Бар'єр непроникний для іонів рідини. Тому іони, рухаючись від одного електрода до іншого, осідають на бар'єрі, «розтікаються» по його поверхні й заряджають її. Завдяки цьому електричне поле в проміжку стає більш рівномірним, що приводить до збільшення розрядної напруги. Крім цього, бар'єр затруднює утворення суцільних провідних містків з волокнистих речовин, що перебувають у маслі. Дія бар'єрів більш ефективна у нерівномірних полях. При короткочасних імпульсних впливах напруги бар'єри менш ефективні, ніж на постійній і змінній напругах.

На рис. 5.7 представлено відносна зміна пробивної напруги $U_{\delta}/U_{\text{пр}}$ ($U_{\text{пр}}$ – пробивна напруга чисто масляного проміжку, а U_{δ} – пробивна напруга того ж проміжку з бар'єром) залежно від положення бар'єра U_{δ}/S (S – відстань між електродами, вона постійна, а S_{δ} – відстань від вістря до

бар'єра) у масляному проміжку, утвореному електродами *вістря-площина* при впливі змінної напруги із частотою 50 Гц.

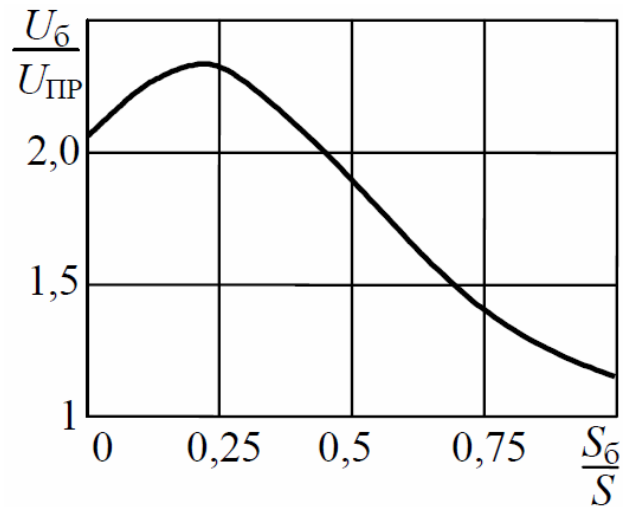


Рис. 5.7. Вплив бар'єра на пробивну напругу масляного проміжку:
електроди вістря-площина; напруга 50 Гц, $S = 75$ мм

Бар'єр – плоский електрокартон товщиною 5 мм. Відстань до бар'єра вимірюється від вістря. У даній системі координат пробивна напруга масляного проміжку без бар'єра дорівнює 1. Наявність бар'єра приводить до збільшення пробивної напруги. Максимальний ефект відповідає відстані до бар'єра $S_б \approx 0,25S$, що добре корелює з аналогічним ефектом для газу.

Маслобар'єрна ізоляція широко застосовується у високовольтній техніці при виготовленні трансформаторів, вводів, реакторів і т.п.

6. ЕЛЕКТРИЧНІ РОЗРЯДИ У ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКАХ

6.1 Пробій твердої ізоляції

Електрична міцність твердої ізоляції вище, ніж газоподібної та рідкої: з межами $U_{\text{пртв}} > U_{\text{прр}} > U_{\text{прг}}$.

Електрична міцність твердої ізоляції залежить:

- 1) від форми електричного поля;
- 2) виду напруги й полярності;
- 3) часу впливу напруги;
- 4) однорідності діелектрика;
- 5) електрофізичних характеристик (полярний-неполярний, $\text{tg} \delta$, ϵ , γ і ін.)
- 6) температури.

Розрізняють три види пробою твердого діелектрика:

- 1) електричний – $E \approx 10^2 - 10^3$ кВ/мм;
- 2) тепловий – $E \approx 10 - 10^2$ кВ/мм;
- 3) старіння – $E \approx 10$ кВ/мм і менш.

Тверда ізоляція містить у собі всі види твердих діелектриків від плівок до товстої монолітної.

У табл. 6.1 наведені деякі електричні характеристики твердої ізоляції, які можуть бути затребувані в процесі її експлуатації.

Таблиця 6.1 – Характеристики ізоляції

Електричні	Механічні	Теплові	Хімічні	Інші
$U_{\text{пр}}$; $U_{\text{пер}}$; $U_{\text{роб}}$; $U_{\text{сухо розр}}$; ρ_v, ρ_s ; $\text{tg } \delta$; $t = f(E, f)$	$\sigma_{\text{розт}}$; $\sigma_{\text{стис}}$; $\sigma_{\text{виг}}$; твердість; гнучкість; еластичність	$T_{\text{кип}}$; $T_{\text{плавл}}$; $T_{\text{заст}}$; теплопро- відність; теплоємність; теплове розширення	стабільність; розчинність; дія на інші діелектрики	питома вага; абсорбція вологи; опромінення; мікроорганізм- и й ін.

У табл. 6.2, наведені електрофізичні характеристики деяких твердих діелектриків, що мають широке застосування в енергетиці, при нормальних умовах навколишнього середовища. Електрична міцність ($E_{\text{пр}}$) визначалася на змінній напрузі при швидкості підйому напруги 1...2 кВ/с.

Найбільш сильний вплив на електричну міцність твердої ізоляції чинять час прикладання напруги, температура, товщина. Залежність пробивної напруги від часу прикладання напруги називається вольт-часовою характеристикою. Вона наведена на рис. 6.1.

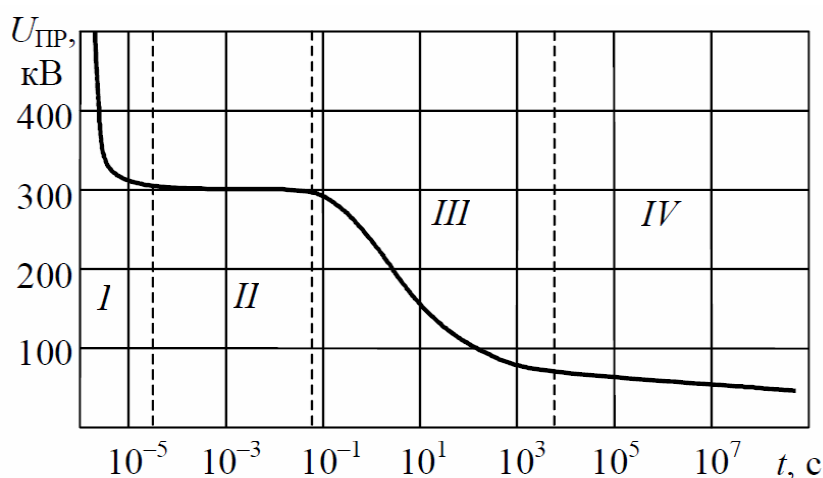


Рис. 6.1 Вольт-часова характеристика твердої ізоляції:

- I – електричний пробій, запізнювання розвитку каналу розряду;
- II – електричний пробій, $t > 0,1\text{с}$, не залежить від температури;
- III – тепловий пробій, $t > 0,1\text{с}$, різке зниження $U_{\text{пр}}$ в часі;
- IV – старіння, $U_{\text{пр}}$ мало змінюється, а час до пробію зростає значно

На кривій виділяють чотири області. Області I і II відповідають електричному пробію. Час додатка напруги $t < 0,1\text{с}$. Різке зростання пробивної напруги в області I обумовлено запізнюванням розвитку розряду щодо часу прикладання напруги. Область III характеризується різким спадом пробивної напруги, що говорить про переважаючу роль теплових процесів. Область IV – повільне зниження пробивної напруги зі збільшенням часу впливу; пов'язане з повільними процесами старіння, деградації твердої ізоляції.

Таблиця 6.2 – Електричні характеристики твердих діелектриків

Діелектрик	Торгова марка	$E_{пр}$, кВ/см	ε	$tg \delta$	Об'ємний опір ρ , Ом·см	Робоча температура (максимальна) $T_{раб}$, °C
Полиетилен низкої щільності	-	450...550	2,2...2,3	0,0002	10^{15}	90
Полиетилен високої щільності	-	450...550	2,2...2,4	0,0003	10^{15}	90
Полівінілхлорид (ПВХ)	вініпласт	350...450	3,2	0,02	10^{13}	90
Політетрафторетилен	фторопласт	250...270	1,9...2,2	0,002	$10^{15}...10^{18}$	до 260
Полімітилметакрилат	огрскло	150...250	3,6	0,06	$10^{10}...10^{11}$	-
Полістирол	стирофлекс	250	2,5...2,6	0,0002	10^{15}	70
Поліетілентерефталат	лавсан, майлар дакрон	1800	3,1...3,2	0,003	10^{15}	120
Полиформальдегід	-	200...230	3,7	0,0004	10^{12}	105
Поли-ε-капроамід	капрон	220	5,0...140	0,06...0,1	10^{11}	105
Епоксидний заливальний компаунд типу КЕ-3	-	370	4,4	0,0008	$3,5 \cdot 10^{13}$	-
Гетинакс (тип 113)	-	84	5,5	0,35	10^7	-
Текстоліт (тип 171)	-	50...100	5,0...6,0	0,3...0,05	10^6	105
Стеклотекстоліт (тип 221)	-	115	5,5	0,04	10^{10}	130
Гума типу РТІ-1	-	419	3,4	0,021	$2,4 \cdot 10^{13}$	-
Фарфор	-	330	6,0...7,0	0,025	$3,1 \cdot 10^{11}$	-70
Ебоніт	-	170...250	3,5	0,01	10^{15}	-
Дельтадревесина	-	80...160	7,0...8,0	0,06...0,1	$10^{10}...10^{12}$	-

Електрична міцність $E_{пр}$ твердої ізоляції зростає зі зменшенням її товщини й особливо швидко – в області мікронних товщин. Цей ефект використовують в ізоляції конденсаторів, кабелів, введень і ін. Вплив температури ілюструється рис. 6.2, де наведена залежність електричної міцності порцеляни від температури. Видно, що до температури $\sim +75^\circ\text{C}$ пробивна напруженість порцеляни $E_{пр}$ практично не змінюється (область А).

Подальше збільшення температури приводить до різкого зменшення $E_{\text{пр}}$ (область Б).

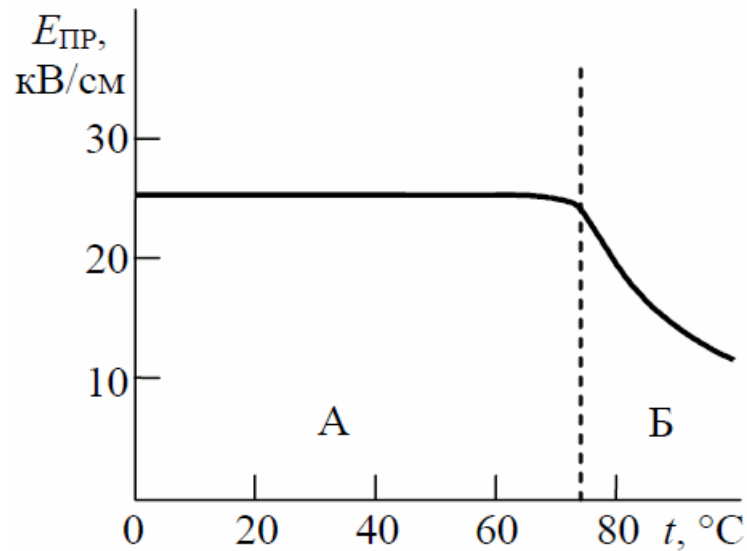


Рис. 6.2. Залежність пробивної напруги від температури для порцеляни (напруга 50 Гц)

Розвиток теплового пробою у твердому діелектрику загалом може бути представлене у вигляді наступної послідовності:

$$U_{\text{д}} \rightarrow I_{\text{д}} \rightarrow T_{\text{д}} \uparrow \rightarrow \gamma \uparrow \text{ и } \text{tg} \delta \uparrow \rightarrow I_{\text{д}} \uparrow \rightarrow T_{\text{д}} \uparrow \text{ и т.д.}$$

де $U_{\text{д}}$ – напруга, прикладена до ізоляції;

$I_{\text{д}}$ – струм, що тече через ізоляцію;

$T_{\text{д}}$ – температура ізоляції;

γ – провідність ізоляції;

$\text{tg} \delta$ – діелектричні втрати в ізоляції.

Суть теплового пробою ізоляції можна представити у вигляді рис. 6.3, де Q_1 – тепло, виділене в ізоляції за рахунок джоулевих і діелектричних втрат, Q_2 – тепло, що відводить від ізоляції в навколишнє середовище.

Виділене тепло визначається як

$$Q_1 = \omega C \operatorname{tg} \delta U^2,$$

а відведене тепло як

$$Q_2 = kS(T - T_0),$$

де ω – кутова частота;

C – ємність виробу;

$\operatorname{tg} \delta$ – діелектричні втрати в ізоляції;

k – коефіцієнт теплопередачі;

S – площа поверхні ізоляції;

T_0 – температура навколишнього середовища;

T – температура всередині діелектрика.

Зміна прикладеної напруги до ізоляції приводить до зміни втрат у ній. На рис. 6.3 $Q_1(U_1)$, $Q_1(U_2)$, $Q_1(U_3)$ – тепло, виділене при $U_1 < U_2 < U_3$, а Q_2 – тепло, відведене від ізоляції.

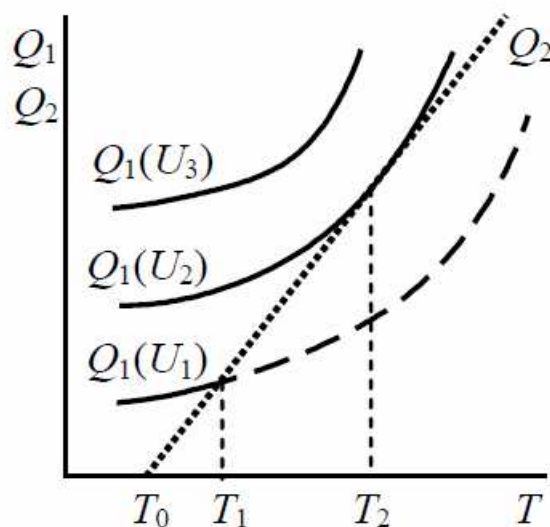


Рис. 6.3. Зміна тепла, що виділяється, Q_1 і тепла, що відводиться, Q_2 в ізоляції при різних U

Для U_1 при $T_1 + \Delta T - Q_2 > Q_1$ – немає нагріву.

Для U_2 при $T_2 + \Delta T - Q_2 < Q_1$ – тепловий пробій.

Для U_3 – завжди тепловий пробій.

T_2 – місце теплової рівноваги. Робоча температура $T_{роб} < T_2$.

6.2 Перекриття ізоляції

Перекриттям називають розряд по границі розподілу двох середовищ, найчастіше ця границя твердий діелектрик – газ. Напруга перекриття $U_{пер}$ завжди істотно менше пробивної напруги $U_{пр}$ чисто газового проміжку з тими ж електродами.

Розглянемо вплив твердого діелектрика на виникнення та розвиток розряду в повітрі уздовж поверхні ізолятора. У конструкції (на рис. 6.4а) силові лінії електричного поля паралельні поверхні діелектрика й поле однорідне. У конструкції (на рис. 6.4б) поле неоднорідне і тангенціальна складова напруженості поля на поверхні діелектрика E_τ переважає над нормальною складовою E_n . У конструкції (на рис. 6.4в) поле також неоднорідне, але переважає нормальна складова. Перша конструкція порівняно рідко зустрічається в реальних умовах, але зручна при виявленні впливу характеристик діелектрика на виникнення розряду, друга та третя конструкції зустрічаються часто (опорні та прохідні ізолятори).

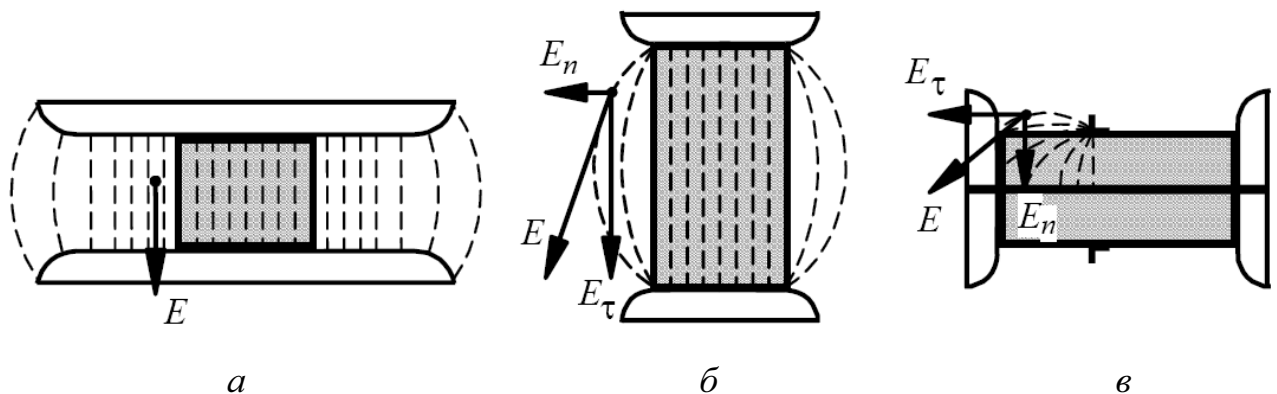


Рис. 6.4. Характерні конструкції повітряних проміжків із твердим діелектриком

В ізоляційній конструкції (рис. 6.4а) електрична міцність проміжку з діелектриком менше, ніж міцність чисто повітряного проміжку. Це пов'язане з адсорбцією вологи з навколишнього повітря на поверхні діелектрика, а також з мікрозазорами між твердим діелектриком і електродом. Поверхня всіх тіл у вологому повітрі покрита найтоншою плівкою води. Іони, що утворюються в цій плівці під дією електричного поля, переміщуються до електродів. У результаті цього поле поблизу електродів підсилюється, а в середині проміжку – послаблюється. Посилення поля поблизу електродів призводить до зниження електричної міцності проміжку. Це зниження тим більше, чим гігроскопічніше діелектрик.

Наприклад, скло є більш гігроскопічним матеріалом, ніж глазурований фарфор, тому напруга перекриття уздовж поверхні скла нижче, ніж уздовж фарфору.

Зменшення напруги перекриття ізолятора при наявності мікрозазору між діелектриком і електродом або мікротріщини на поверхні діелектрика пов'язано зі збільшенням у них напруженості поля внаслідок розходження діелектричних проникностей повітря та твердого діелектрика (діелектрична проникність твердого діелектрика у 3–4 рази більше, ніж повітря). Збільшення напруженості поля в мікрозазорах приводить до виникнення там іонізаційних процесів, продукти яких (іони та електрони), потрапляючи в основний проміжок, створюють місцеве посилення поля, що призводить до зменшення напруги перекриття.

Для збільшення розрядної напруги проміжку із твердим діелектриком прагнуть використовувати малогігроскопічні діелектрики або створити покриття з малогігроскопічних матеріалів, що захищають діелектрик від контакту з парами води (наприклад, глазуровання поверхні фарфору), а також забезпечити надійне, без мікрозазорів, сполучення тіла ізолятора з металевими арматурами, використовуючи цементні закладення та еластичні провідні прокладки.

В ізоляційній конструкції (рис. 6.4б) поле неоднорідне, отже, як і у випадку чисто повітряного проміжку, розрядна напруга менше, ніж в однорідному полі. Вплив гігроскопічності діелектрика та мікрозазорів тут якісно такий же, як і в конструкції на рис. 6.4а, але воно слабкіше виражено, тому що електричне поле і без того істотно неоднорідне. При досить великій неоднорідності поля в цій ізоляційній конструкції, як і в чисто повітряному проміжку, виникає коронний розряд. Окиси азоту і озон, що утворюється при цьому, впливають на твердий діелектрик. Найбільшу небезпеку коронний розряд представляє для полімерної ізоляції, особливо якщо він має стрімерну форму. Температура в каналі стрімера досить висока, і дотик його з поверхнею діелектрика може призводити до термічного розкладання діелектрика та утворенню обвугленого сліду з підвищеною провідністю. Довжина цього сліду (треку) згодом зростає, що призводить до перекриття ізолятора з необоротною втратою їм електричної міцності.

Все сказане справедливе і для конструкції на рис. 6.4в. Велика нормальна складова електричного поля сприяє зближенню каналу стрімера з поверхнею діелектрика, що підвищує ймовірність ушкодження діелектрика. Електрична міцність цієї конструкції ще менше, ніж конструкції на рис. 6.4б. Канали стрімерів, що розвиваються уздовж поверхні діелектрика, мають значно більшу ємність стосовно внутрішнього (протилежного) електроду, ніж у конструкції з переважно тангенціальною складовою поля. Тому через стрімерні канали проходить порівняно великий струм. При певному значенні напруги струм зростає настільки, що температура стрімерних каналів стає достатньою для термічної іонізації. Термічно іонізований канал розряду, що розвивається уздовж діелектрика, на поверхні якого нормальна складова напруженості поля перевищує тангенціальну складову, називають каналом ковзаючого розряду.

Провідність каналу ковзаючого розряду значно більше провідності каналу стрімера, тому спадання напруги в каналі ковзаючого розряду менше, а на неперекритій частині проміжку – більше, ніж у каналах стрімера. Збільшення напруги на неперекритій частині проміжку призводить до подовження каналу

ковзаючого розряду та повного перекриття проміжку при меншому значенні напруги між електродами.

Довжина каналу ковзаючого розряду залежить від його провідності, а отже, від значення струму в ньому. У свою чергу, струм залежить від напруги між електродами, зміни напруги і ємності каналу стрімера щодо протилежного електрода. Вплив цих параметрів відображено в емпіричній формулі Теплера, відповідно до якої довжина каналу ковзаючого розряду

$$l_{ck} = \chi_1 \cdot C^2 \cdot U^5 \cdot \sqrt[4]{\frac{dU}{dt}}, \quad (6.1)$$

де χ_1 – коефіцієнт, що визначається дослідним шляхом;

C – питома поверхнева ємність (ємність поверхні діелектрика, по якій розвивається розряд щодо протилежного електрода;

U – прикладена напруга.

З формули (6.1), при підстановці замість l_{ck} відстані між електродами по поверхні діелектрика L , можна визначити значення напруги U_p , необхідного для перекриття ізолятора. Якщо ж прийняти $C = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S / d$, де d – товщина діелектрика, а площа S прийнята рівною 1 см^2 , і вважати значення d / dt постійним, що в першому наближенні відповідає сталості частоти прикладеної напруги, з формули (6.1) одержимо вираз для знаходження розрядної напруги

$$U_p = \chi \cdot L^{0,2} \left(\frac{d}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \right)^{0,4}, \quad (6.2)$$

який називається формула Теплера.

З формули Теплера слідує, що ріст довжини ізолятора дає відносно мале підвищення розрядної напруги. Тому для збільшення розрядних напруг прохідних ізоляторів зменшують питому поверхневу ємність шляхом збільшення діаметра ізолятора біля фланця, з якого можна чекати розвитку

розряду. Використовується також нанесення біля фланця напівпровідного покриття, що сприяє вирівнюванню розподілу напруги по поверхні ізолятора і, отже, призводить до збільшення розрядних напруг.

При постійній напрузі питома поверхнева ємність практично не впливає на розвиток розряду та значення розрядної напруги стає близьким до розрядної напруги чисто повітряного проміжку.

7. ІЗОЛЯТОРИ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ І ПІДСТАНЦІЙ

7.1 Основні характеристики ізоляторів

Ізоляторами називають електротехнічні вироби, призначені для ізолювання різнопотенціальних частин електроустановки, тобто для запобігання протікання електричного струму між цими частинами електроустановки, і для механічного кріплення струмоведучих частин.

За розташуванням струмоведучої частини розрізняють опорні, прохідні й підвісні ізолятори, призначення яких прямо визначаються їхніми назвами. *За конструктивним виконанням* ізолятори діляться на тарілчаті (ізоляційна частина у формі тарілки), стрижневі (ізоляційна частина у вигляді стрижня або циліндра) і штирові (ізолятор має металевий штир, що несе основне механічне навантаження). *За місцем установки* розрізняють лінійні ізолятори, що використовуються для підвіски проводів ліній електропередачі, і станційні ізолятори, що використовуються на електростанціях, підстанціях і постах секціонування. В останньому плані ті самі типи ізоляторів, наприклад, підвісні тарілчаті, можуть бути й лінійними, і станційними.

Основними характеристиками ізоляторів є розрядні напруги, геометричні параметри й механічні характеристики, а також номінальна напруга електроустановки, для якого призначений ізолятор.

До розрядних напруг ізоляторів відносять три напруги перекриття й одна пробивна напруга:

- *сухорозрядна напруга* $U_{\text{схр}}$ – напруга перекриття чистого сухого ізолятора при напрузі частотою 50 Гц (ефективне значення напруги);
- *мокророзрядна напруга* $U_{\text{мкр}}$ – напруга перекриття чистого ізолятора, змоченого дощем, що падає під кутом 45° до вертикалі, при напрузі частотою 50 Гц (ефективне значення напруги);
- *імпульсна розрядна напруга* $U_{\text{імп}}$ – п'ятидесятипроцентна напруга перекриття стандартними грозовими імпульсами (амплітуда імпульсу, при якій

з десяти поданих на ізолятор імпульсів п'ять завершуються перекриттям, а решта п'ять не призводять до перекриття);

- **пробивна напруга** $U_{\text{пр}}$ – напруга пробою ізоляційного тіла ізолятора на частоті 50 Гц; рідко використовувана характеристика, оскільки пробій викликає необоротний дефект ізолятора й напруга перекриття повинна бути менша пробивної напруги.

У підвісних тарілчатих ізоляторів мокророзрядна напруга в 1,8..2 рази менше сухорозрядної напруги. Ці ізолятори спроектовані так, щоб у сухому стані пробивна напруга перевищувала напругу перекриття приблизно в 1,6 разів, що забезпечує відсутність пробою при перенапругах. У стрижневих ізоляторів розходження мокророзрядної й сухорозрядної напруги не настільки велике, порядку 15..20 %. Імпульсна розрядна напруга практично не залежить від зволоження й забруднення ізолятора й звичайно приблизно на 20 % більша амплітуди сухорозрядної напруги. Забруднення на поверхні ізолятора сильно знижують мокророзрядну напругу ізолятора.

До геометричних параметрів відносять наступні:

- **будівельна висота** H_6 , тобто габарит, що ізолятор приймає в конструкції після його установки; у деяких ізоляторів, наприклад, у тарілчатих підвісних, будівельна висота менше реальної висоти ізолятора;

- **найбільший діаметр** D ізолятора;
- **довжина шляху витoku** по поверхні ізолятора l_y ;
- **найкоротша відстань між електродами по повітрю** l_c (сухорозрядна відстань), від якої залежить сухорозрядна напруга;

- **мокророзрядна відстань** l_m , визначена в припущенні, що частина поверхні ізолятора стала провідною через змочування дощем, що падає під кутом 45° до вертикалі.

Довжина шляху витoku ізолятора нормується ДСТ 9920-89 для різних категорій виконання й залежно від ступеня забруднення атмосфери (табл. 7.1). Ефективною довжиною шляху витoku називають довжину шляху, по якому розвивається розряд по забрудненій поверхні ізолятора.

Таблиця 7.1 Нормовані ефективні довжини шляху витоку зовнішньої ізоляції електроустаткування

Категорія виконання ізоляції	Ступінь забруднення атмосфери	Питома ефективна довжина шляху витоку, см/кВ, не менше, при номінальній напрузі $U_{ном}$, кВ	
		6-35	110-750
А	1,2,3	1,9-2,2	1,4-1,9
Б	3,4,5	2,2-3,0	1,8-2,6
В	5,6	3,0-3,5	2,6-3,1

Основними *механічними характеристиками* ізоляторів є три такі характеристики:

- мінімальна руйнуюча сила на розтягання, що має переважне значення для підвісних ізоляторів;
- мінімальна руйнуюча сила на вигин, що має переважне значення для опорних і прохідних ізоляторів;
- мінімальна руйнуюча сила на стиск, що для більшості ізоляторів має другорядне значення.

Вимірюють мінімальну руйнуючу силу в деканьютонах (даН), що майже збігається з кілограмом сили, або в кілоньютонах (кН).

Виготовляють ізолятори з електротехнічного фарфору, загартованого електротехнічного скла та полімерних матеріалів (кремнійорганічна гума, склопластик, фторопласт).

7.2 Лінійні ізолятори

Лінійні ізолятори застосовуються для кріплення й ізолювання проводів і тросів повітряних ліній електропередачі. Лінійні ізолятори за конструкцією розділяються на *тарілчаті, штирові й стрижневі*.

Штирові ізолятори виготовляють із електротехнічного фарфору або загартованого скла й монтуються на опорах за допомогою штирів або гаків. Одна з можливих конструкцій штирового ізолятора наведена на рис. 7.1.

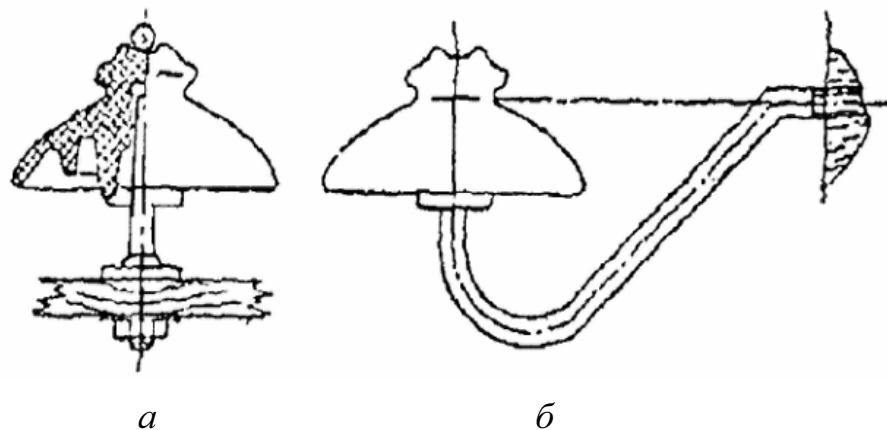


Рис. 7.1. Штировий ізолятор ШФ10-В:

а – кріплення до траверси; б – кріплення на стовпі

Позначення, наприклад, ШФ10-В – штировий, фарфоровий, номінальна напруга 10 кВ, конструктивне виконання В (усього існує три варіанти конструктивного виконання – А, Б, В). Через велике згинаюче зусилля на такий ізолятор, застосовують штирові ізолятори на напруги не вище 35 кВ.

Підвісні ізолятори застосовуються для напруг більше 35 кВ. Підрозділяються на *тарілчаті* (шарнірні) і *стрижневі*.

Тарілчаті ізолятори виготовляють із електротехнічного фарфору або останнім часом, в основному, із загартованого скла, тому що вони більш дешеві й зручні в експлуатації. Одна з можливих конструкцій підвісного тарілчатого ізолятора представлена на рис. 7.2.

Шапка 2 і стрижень 3 забезпечують шарнірне з'єднання одного ізолятора з іншим при зборі ізоляторів у гірлянду. Ізолятори зазнають тільки зусилля на розтяг, але, завдяки конструктивному виконанню, голівка 5 ізолятора працює на стиск і тому витримує більші механічні навантаження (до 30...50 тс).

Позначення ізолятора, наприклад, ПСГ6-А: підвісний, скляний, брудостійкий. Мінімальне руйнівне навантаження – 6 тс.

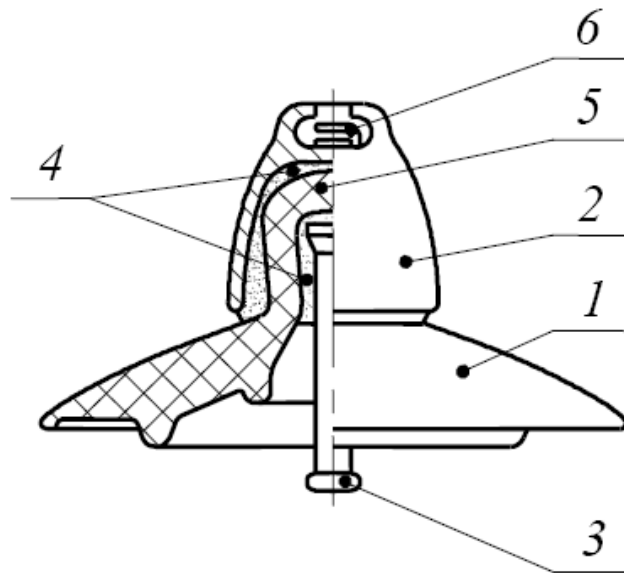


Рис. 7.2. Підвісний тарілчатий ізолятор:

1 – ізолююче тіло ізолятора; 2 – чавунна шапка ізолятора; 3 – сталевий стрижень; 4 – піщано-цементне зв'язування; 5 – голівка ізолятора; 6 – замок

Підвісні стрижневі ізолятори виготовляють із високоміцного фарфору або полімерних матеріалів. Один такий ізолятор може замінити гірлянду з 7 тарілчатих ізоляторів на напругу 110 кВ. Шарнірно кріпиться за допомогою двох шапок із замками на кінцях ізолятора (рис. 7.3). Перевагою стрижневих ізоляторів є непробивність. Крім того, за рахунок малого діаметра ізолятора підвищуються градієнти електричного поля по поверхневому покриттю.

Механічна міцність фарфорових стрижневих ізоляторів менша, ніж у тарілчатих, оскільки фарфор в стрижневих ізоляторах працює на розтягання, а іноді й на вигин, а в тарілчатих – на стиск усередині чавунної шапки ізолятора.

Несучою конструкцією полімерного ізолятора звичайно є склопластиковий стрижень, що має слабку дугостійкість. Цей стрижень закривають ребристим чохлом із кремнійорганічної гуми або фторопласта, які мають відразливі властивості до вологи й забруднень.

Позначення ізолятора, наприклад СФ-110/2,25: стрижневий, фарфоровий, номінальна напруга 110 кВ, мінімальне руйнівне навантаження – 2,25 тс.

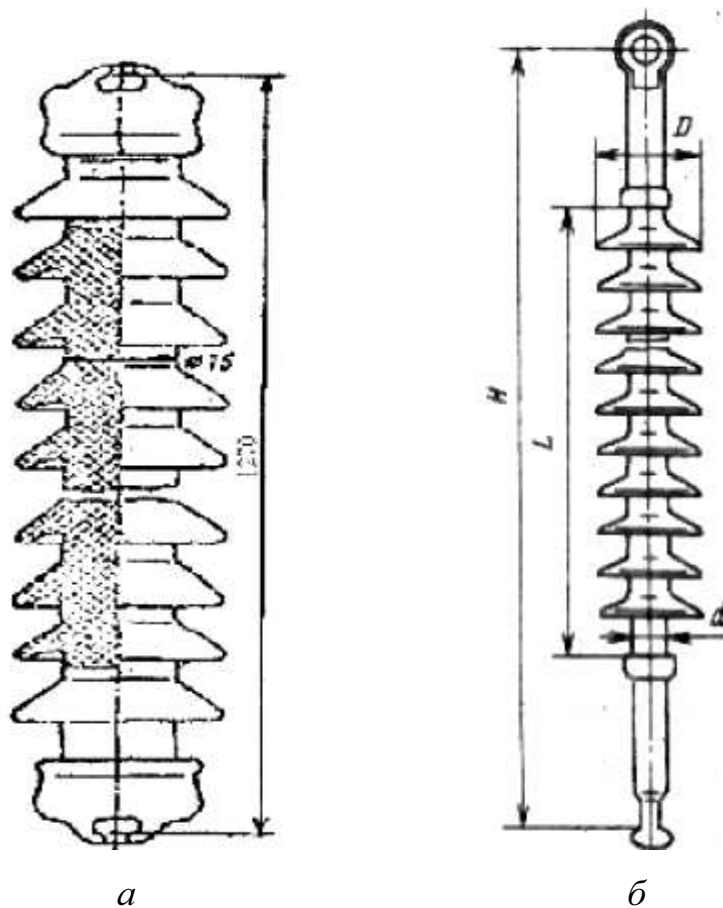


Рис. 7.3. Стрижневі ізолятори: *а* – фарфоровий; *б* – полімерний

7.3 Розподіл напруги уздовж гірлянди ізоляторів

Гірлянда ізоляторів, складена з підвісних тарілчатих ізоляторів, є однією з найбільш часто використовуваних видів ізоляції проводів повітряних ліній. Напруга, прикладена до гірлянди ізоляторів, *розподіляється нерівномірно*, і на різні ізолятори приводяться різні долі напруг, що знижує напругу початку корони й напругу перекриття гірлянди. У найбільш несприятливій ситуації перебуває ізолятор, найближчий до провода.

Основною причиною неоднакових напруг на ізоляторах можна вважати наявність паразитних ємностей металевих частин ізоляторів стосовно землі (рис. 7.4). У гірлянді можна розрізнити три види ємностей: власні ємності ізоляторів C_0 , ємності металевих частин стосовно землі C_1 і ємності стосовно

провода C_2 . Порядок величин ємностей приблизно такий: $C_0 \approx 50$ пФ, $C_1 \approx 5$ пФ, $C_2 \approx 0.5$ пФ.

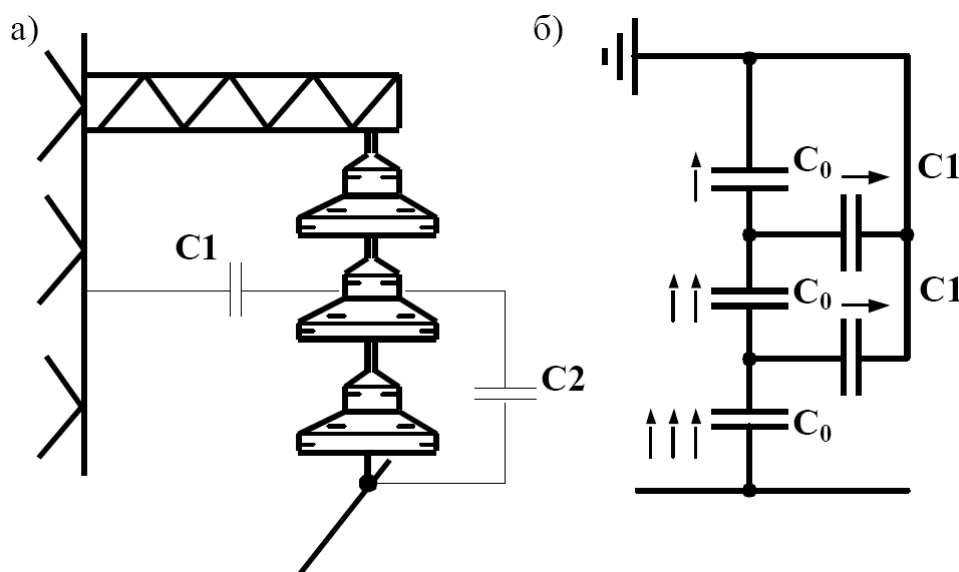


Рис. 7.4. Гірлянда ізоляторів і схема заміщення гірлянди

У першому наближенні ємністю ізоляторів стосовно провода можна знехтувати, і тоді схема заміщення гірлянди сухих ізоляторів виглядає як на рис. 7.4б. При змінній напрузі по ємнісних елементах протікає ємнісний струм, і струм першого знизу ізолятора розділяється на струм ємнісного елемента стосовно землі та струм частини гірлянди, що залишилася. Через другий знизу ізолятор тече ємнісний струм меншої величини, і падіння напруги максимальне на нижньому, найближчому до провода ізоляторі, що перебуває в найгірших умовах. При кількості ізоляторів більше трьох-чотирьох мінімальна напруга доводиться, однак, не на самий верхній ізолятор. Наявність ємностей C_2 призводить до деякого вирівнювання нерівномірності спадань напруги й мінімальна напруга виявляється на другому-третьому (або далі, залежно від числа ізоляторів у гірлянді) ізоляторі зверху. На рис. 7.5 показаний розподіл напруги на гірлянді з 22 ізоляторів лінії 500 кВ; на один ізолятор приводиться від 9 до 29 кВ при середньому значенні 13 кВ.



Рис. 7.5. Частка напруги на ізоляторах у гірлянді з 22 ізоляторів

Для вирівнювання напруги по ізоляторах гірлянди застосовують екрани у вигляді тороїдів, овалів, вісімок, що закріплюють знизу гірлянди; на лініях з розщепленими фазами утоплюють найближчі ізолятори між проводами розщепленої фази; розщеплюють гірлянду біля провода на дві. Всі ці міри вирівнюють розподіл напруги через збільшення ємності C_2 .

7.4 Наближений розрахунок вологорозрядної напруги ізолятора зовнішньої установки

В основі вибору зовнішньої ізоляції перебуває вимога забезпечення заданої надійності за певних умов експлуатації, які характеризуються механічними й електричними навантаженнями ізоляційних конструкцій. Ізоляція буде надійною у випадку витримання навантажень, що перевищують експлуатаційні.

Напруга поверхневого перекриття для сухої й чистої зовнішньої ізоляції, що відповідає сухорозрядній напрузі $U_{схр}$, перевищує напругу поверхневого перекриття $U_{мкр}$ в умовах чистої поверхні під дощем краплинної структури й інтенсивності на рівні зливого дощу (порядку 3...5 мм/хв). Однак ще більш низька електрична міцність буде в ізоляції попередньо запиленої й потім зволоженої без змиву бруду; напруга перекриття визначена в цьому випадку як вологорозрядна $U_{вр}$. Ізоляція, обрана по напрузі $U_{вр}$ з урахуванням вимог

економічно обґрунтованого обмеження числа відмов (перекриттів), надійна в інших менш жорстких умовах експлуатації.

Вибір зовнішньої ізоляції для її надійної експлуатації в забрудненій атмосфері можливий за умови, що інтенсивність і хімічні характеристики забруднення в місці передбачуваної установки ізоляції відомі.

Масові спостереження дозволили рекомендувати для різних територій градацію ступеня забруднення ізоляції від незначної (I) до дуже важкої (IV). Так, незначне забруднення характерне для сільськогосподарських районів з інтенсивною обробкою ґрунту й чистих промислових центрів. Великі промислові центри з інтенсивним виділенням смогу, близькість підприємств типу електростанцій, хімічних комбінатів і т.п. дають важку (III) ступінь забруднення.

Напруги $U_{ер}$ заданого ізолятора при відомих забрудненнях оцінюються експериментально або розраховуються.

Розрахунок вологорозрядної напруги $U_{ер}$ заснований на моделі процесу поверхневого перекариття. Дрібні (до 20 мкм) і більші частки із забрудненого повітря осідають і закріплюються на поверхні підвісних і опорних ізоляторів. Коли шар пилу зволожиться дрібнокапельною вологою (туман, роса, дощ, що мрячить), на поверхні утвориться шар електроліту внаслідок часткового розчинення у воді шару забруднення. Як правило, ізолятори мають осьову симетрію зі змінним діаметром по довжині шляху витoku й окремих кільцевих ділянок шару електроліту мають різні опори. Під дією робочої напруги $U_{роб}$ прикладеної до ізолятора, у шарі електроліту протікає струм поверхневого витoku, що досягає десятків міліампер і здатний значно перегрівати тонкий шар електроліту. У місці випадкового тоншання шару й наступного зростання його опору при збереженні незмінним струму витoku на цій ділянці зростає ймовірність випару води, утвориться суха кільцева зона висотою 2...3 мм.

Виникла суха кільцева зона буде перекарита внаслідок перерозподілу падінь робочої напруги $U_{роб}$ по довжині шляху витoku ізолятора з підвищенням напруги на підсушеній ділянці Перекариття спостерігається у формі короткої

дуги, опір на одиницю довжини якої r_g визначається її вольт-амперною характеристикою.

Середня напруженість електричного поля уздовж дуги

$$E_d = \frac{C}{I^n}, \quad (7.1)$$

де I – струм у дузі, А; C , $BA^n/м$ і n – постійні, причому їхні значення слабо залежать від довжини дуги l_d і атмосферного тиску;

Орієнтовно в розрахунках можна приймати $C = (1.4...1.8) \cdot 10^4 BA^n/м$ або $C = (140...180) BA^n/см$, $n = 0.5...0.55$.

Коротка дуга, що виникла, в наступні моменти часу має дві можливості: згаснути або подовжуватися аж до повного перекриття ізолятора. Критичною умовою, при цьому, є співвідношення опору одиниці довжини дуги r_d та погонного опору зволоженої поверхні, що перекривається дугою r_n . Припускають, що подовження дуги можливо при $r_d < r_n$, а критична умова перекриття при визначенні напруги $U_{ер}$ формулюється у вигляді $r_d = r_n$.

Розглянемо циліндричний ізолятор (рис. 7.6) діаметр d ізоляційного елемента якого постійний за поточною довжиною шляху витoku L_y ($L_y \geq l_y > 0$), а повна довжина шляху витoku L_y дорівнює довжині ізоляційної частини ізолятора H_i .

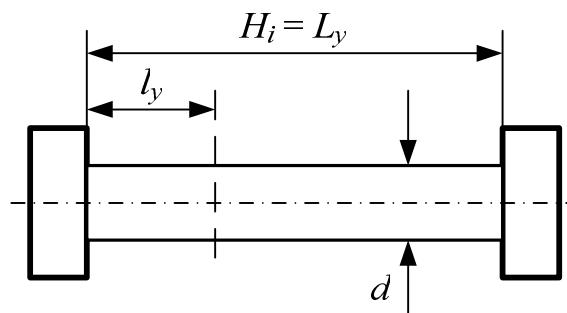


Рис. 7.6. Циліндричний ізолятор

Передбачувана рівномірна за товщиною плівка електроліту характеризується погонною провідністю γ_n . Тоді опір $r_n = 1/(\gamma_n \pi d)$. Опір на всій довжині шляху витoku L_y рівномірно забрудненого циліндричного ізолятора

$$R_n = r_n L_y = \frac{L_y}{\gamma_n \pi d}, \quad (7.2)$$

струм поверхневого витoku

$$I_y = \frac{u}{R_n} = \frac{u \gamma_n \pi d}{L_y} = E \gamma_n \pi d.$$

Сила струму досягає критичного значення I_{kp} за умови можливого подовження дуги аж до повного перекриття ізолятора при $r_n = r_o$. Оскільки із врахуванням (7.1)

$$r_o = \frac{E_o}{I_{kp}} = \frac{C}{I_{kp}^{n+1}},$$

то

$$\frac{C}{I_{kp}^{n+1}} = \frac{1}{\gamma_n \pi d},$$

звідки

$$I_{kp} = (C \gamma_n \pi d)^{\frac{1}{1+n}}. \quad (7.3)$$

Напруга, що створює цей критичний струм через повний опір R_n , відповідає вологорозрядній напрузі

$$U_{ep} = I_{kp} R_n = L_y C^{\frac{1}{1+n}} (\gamma_n \pi d)^{-n \left(\frac{1}{1+n} \right)}. \quad (7.4)$$

Можливості підвищення $U_{ер}$ впливають із аналізу виразу (7.4):

- збільшення довжини шляху витоку L_y ;
- зменшення діаметра d ізоляційної частини;
- зниження поверхневої провідності γ_n .

Струм витоку протікає по поверхні тіла обертання із зовнішньою границею по лінії шляху витоку l_y . Розподіл напруженості електричного поля уздовж шляху витоку l_y залежить від поточного діаметра ізолятора d і розподілу забруднення.

Спостереження дозволяють відзначити більше забруднення нижньої поверхні ребра щодо верхньої поверхні, що обмивається дощем, але зволоження верхньої поверхні буває більшим ніж нижньої. Падіння напруги уздовж шляху витоку l_y може викликати пробій діелектрика біля основи ребра, тому товщина основи обрана як із міркувань механічної міцності, так і за умовою виключення пробою біля основи.

Очевидно, саме на циліндричній частині ізолятора з найменшим діаметром по довжині l_y спадання напруги від струму витоку може виявитися достатнім для виникнення електричних дуг, виникнувши на цій циліндричній частині ізолятора, дуга розвивається при наявності відповідних умов (основна умова $r_o < r_n$) на поверхню ребер і в межі виникає повне перекриття ізолятора. З ростом найбільшого діаметра (габариту) ізолятора d подовження дуги утрудняється.

Звичайно в довідкових матеріалах для ізоляторів вказуються, крім габаритів, руйнуче електромеханічне навантаження, коефіцієнт форми k_ϕ і коефіцієнт ефективності використання довжини ізоляційної частини ізолятора k_{ef} .

Ізолятори для районів з відносно чистою атмосферою звичайно мають співвідношення довжини шляху витоку L_y до будівельної висоти H_δ на рівні 2,2. Забруднення атмосфери збільшує поверхневу провідність γ_n , що виправдовує ріст співвідношення L_y/H_δ до 2,7...3,2. При подальшому

збільшенні цього співвідношення відповідно до експериментів підвищується ймовірність часткових перекриттів уже не безпосередньо по поверхні ізолятора, а по повітряних проміжках між ребрами або юбками. Таким чином, фактична довжина шляху розряду $L_{y\phi}$ стає менше або рівна L_y , співвідношення цих довжин відповідає коефіцієнту ефективності

$$\kappa_{ef} = \frac{L_{y\phi}}{L_y}. \quad (7.5)$$

Чим простіша форма ізоляційної поверхні, тим ближче значення κ_{ef} до одиниці.

Розрахунок вологорозрядної напруги ізолятора складної форми, відмінної від циліндричної, можливий при використанні виразу (7.4) для циліндричного ізолятора при деяких допущеннях.

Для гладкого циліндричного ізолятора з однорідним шаром забруднення провідністю γ_n згідно (7.2) опір поверхневого витоку визначається виразом

$$R_n = \frac{L_y}{\pi d \gamma_n} \quad (7.6)$$

Для ізолятора у вигляді тіла обертання з діаметром $d(l)$, що змінюється по довжині шляху витоку l_y , і в загальному випадку змінною уздовж шляху витоку провідністю γ_n , повний опір визначається виразом

$$R_n = \int_0^{L_y} \frac{1}{\pi d(l) \gamma_n(l)} dl \quad (7.7)$$

В окремому випадку в розрахунок можна ввести деяку усереднену провідність γ_n , тоді (7.7) можна записати як (7.6) за умови введення поняття

еквівалентного діаметра d_e : діаметр d_e дорівнює діаметру гладкого циліндричного ізолятора, еквівалентного по опору R_n і довжині шляху витоку L_y реальному ізолятору, тобто

$$R_e = R_n,$$

$$\frac{L_y}{\pi d_e \gamma_n} = \int_0^{L_y} \frac{1}{\pi d(l) \gamma_n} dl,$$

$$\frac{1}{d_e} = \frac{1}{L_y} \int_0^{L_y} \frac{1}{d(l)} dl. \quad (7.8)$$

Коефіцієнт форми ізолятора

$$\kappa_\phi = \frac{L_y}{\pi d_e} \quad (7.9)$$

Знаючи κ_ϕ , можна розрахувати для ізолятора напругу U_{ep} для заданого значення γ_n по (7.4), попередньо визначивши діаметр d_e по (7.9).

Коефіцієнти κ_ϕ і $\kappa_{e\phi}$ для деяких типів лінійних тарілчатих ізоляторів наведені в табл. 7.2.

Таблиця 7.2

Тип ізолятора	Довжина шляху витоку $L_y, \text{см}$	L_y/H_i	κ_ϕ	$\kappa_{e\phi}$
ПС 70-В	30,0	2,5	0,69	1,0
ПС 120-А	32,5	2,2	0,76	0,85
ПС 300-Б	41,8	2,2	0,77	0,85
ПСГ 70-А	40,0	3,0	1,0	0,80
ПСГ 120-А	42,5	3,0	0,9	0,75

Розрахунок коефіцієнта κ_ϕ для деякого заданого ізолятора досить важкий на рівні визначення еквівалентного діаметра d_e через складність визначення інтеграла $\int_0^{L_y} \frac{dl}{d(l)}$. Можливі два варіанти встановлення зв'язку d від l_y :

аналітичний і графічний. При аналітичному зв'язку $d(l)$ у свою чергу в окремих випадках можна використати табличні інтеграли, але в загальному випадку, як і при завданні графічного зв'язку d від l_y , застосовується чисельне інтегрування.

Далі розглянемо приклади розрахунку κ_ϕ і U_{ep} .

Приклад 1.

Розрахувати напругу U_{ep} для ізоляційної конструкції за рис. 7.7: стрижень (метал, діаметр d_c) притиснутий у центрі до поверхні плоского діелектрика квадратної форми зі стороною a та обмеженого металевою смугою. Напруга прикладається між стрижнем і смугою. Поверхневе забруднення має провідність γ_n .

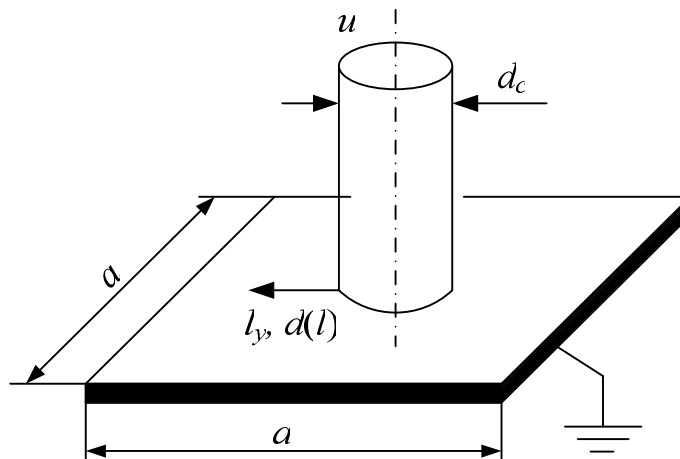


Рис. 7.7

Очевидно, перекриття йде за найкоротшою відстанню і $L_y = 0,5(a - d_c)$. Еквівалентний діаметр d_e знайдемо в такий спосіб. Оскільки відлік зміни шляху розряду l_y збігається з поточним значенням радіуса $0,5d$, то

$$\int_0^{L_y} \frac{dl}{d=2l} = 0,5 \int_{0,5d_c}^{0,5(a-d_c)} \frac{dl}{l} = 0,5 [\ln(0,5(a-d_c)) - \ln(0,5d_c)],$$

тоді

$$d_e = \frac{2L_y}{\ln(0,5(a-d_c)) - \ln(0,5d_c)} \quad \text{і} \quad \kappa_\phi = \frac{L_y}{\pi d_e}.$$

Підстановка виразу для d_e в (7.4) дозволяє безпосередньо розрахувати $U_{вр}$.

Приклад 2.

Ізолятор має діелектрик у вигляді тіла обертання з перетином, показаним штрихуванням на рис 7.8. Перетворимо задане $r(l)$ в залежність $d(l)$, що також показано на рис. 7.8.

Побудуємо інверсну функцію $d^{-1}(l)$, як це показано на рис. 7.9.

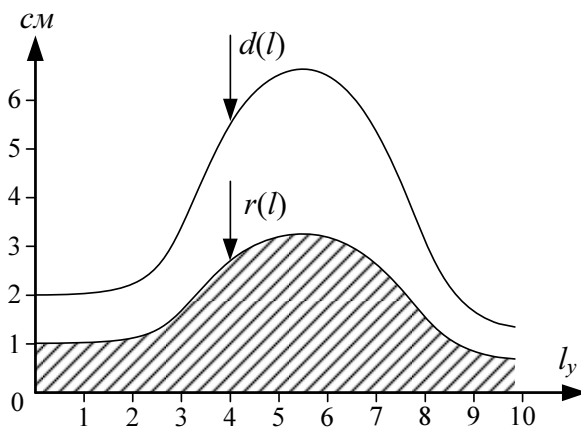


Рис. 7.8.

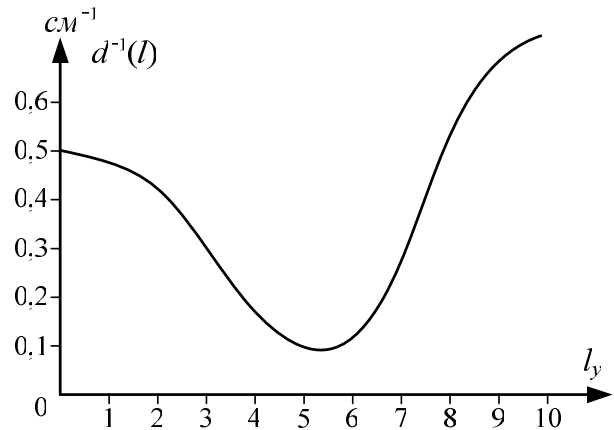


Рис. 7.9

Інтеграл для розрахунку d_e з (7.8) визначимо, наприклад, за формулою трапецій. Позначимо

$$A = \int_{l_y=0}^{l_y=L_y} \frac{dl}{d(l)}; \quad \frac{1}{d(l)} = a(l).$$

Тоді при кроці інтегрування $h = L_y/n$

$$A = 0,5h(a_0 + 2a_1 + 2a_2 + \dots + 2a_{n-1} + a_n).$$

Зі зменшенням h похибка визначення A зменшується.

При рівномірному забрудненні поверхні, коли провідність γ_n не залежить від l_y , розвиток дуги часткового перекриття спостерігається переважно на ділянці з найменшим діаметром d внаслідок найбільшої щільності струму витoku в такому місці й практично повинна мати місце каскадна форма перекриття по ізоляційній поверхні. Це міркування обмежує можливості надійної оцінки напруги $U_{ер}$ по деякому еквівалентному діаметрі для ізоляторів з істотно різними діаметрами, d по довжині шляху витoku l_y і порушує питання про облік у розрахуноку напруги $U_{ер}$ механізму послідовного перекриття ділянок ізолятора, особливо у випадку $\gamma_n(l)$.

Для ізолятора з огинаючим тілом обертання за рис. 7.10 представляється можливим виділити ряд характерних ділянок (наприклад, 1-2, 2-3 і т.д.). У межах цих ділянок каскадне перекриття малоймовірне. Для окремих ділянок визначаємо відповідні d_{e1-2} , d_{e2-3} і т.д.

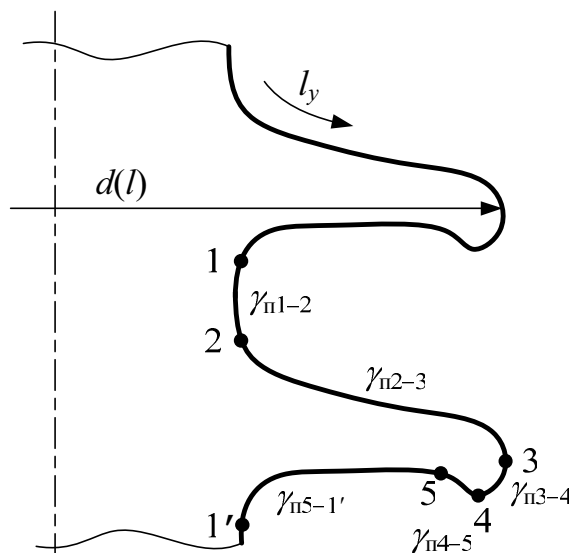


Рис. 7.10

Тоді з позиції опису процесу перекриття вихідний ізолятор представимо

системою ізоляційних дисків з діаметрами d_{e1-2} , d_{e2-3} і т.д. і із плоскими електродами по торцях дисків (рис. 7.11). Кожний з дисків (маючих певні висоти, які прирівнюються до довжини шляху витоку l_{1-2} , l_{2-3} і т.д., певні провідності γ_{n1-2} , γ_{n2-3} і т.д.) у схемі заміщення набору дисків можна представити відповідними резисторами R_{1-2} , R_{2-3} і т.д. розрахованими по (7.2). Для кожного з дисків існує критичний струм $I_{кр1-2}$, $I_{кр2-3}$ і т.д., які розраховуються по (7.3).

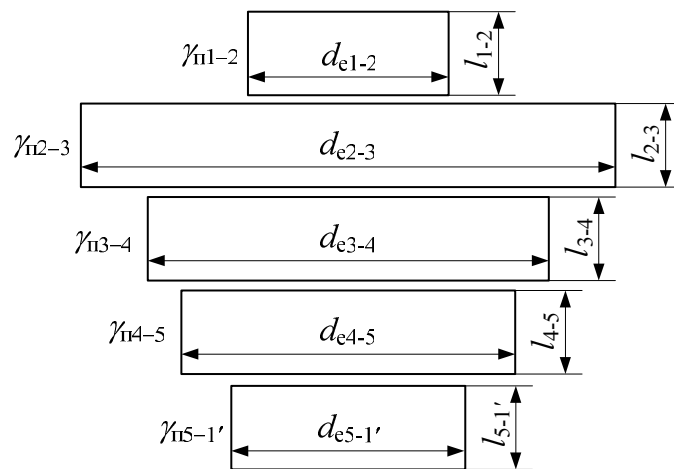


Рис. 7.11

Напруга перекриття системи дисків визначається в такий спосіб. При плавному збільшенні прикладеної до системи дисків напруги струм витоку змінюється спершу пропорційно напрузі. При досягненні найменшого із критичних струмів $I_{кр}$ внаслідок перекриття диска в схемі заміщення виключається відповідний резистор і при збереженні досягнутої напруги струм витоку підвищується стрибкоподібно до нового значення. Воно може або виявитися достатнім для перекриття чергового диска з наступним уже тепер мінімальним значенням струму із числа дисків, що залишилися, або буде потрібне подальше підвищення прикладеної напруги для перекриття диска з мінімальним струмом. Мінімальна напруга перекриття всієї системи дисків прирівнюється до шуканої напруги $U_{ер}$ ізолятора й відповідає протіканню в

ланцюзі ізолятора, що перекривається, струму не менше найбільшого із критичних струмів окремих ділянок.

8. ВНУТРІШНЯ ІЗОЛЯЦІЯ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК

8.1. Ізоляція силових трансформаторів

Ізоляція силових трансформаторів з металевим баком розділяється на зовнішню та внутрішню. *Зовнішня ізоляція* складена повітряними проміжками між вводами, між вводами та заземленим баком, а також по поверхні фарфорових покришок вводів. До *внутрішньої ізоляції* відносять ізоляційні проміжки всередині бака: ізоляцію обмоток, масляної частини вводів, відводів і допоміжних пристроїв.

Ізоляцію обмоток розділяють на головну та поздовжню. *Головна ізоляція* складена ізоляцією між обмотками, між обмотками та магнітопроводом, міжфазною ізоляцією між зовнішніми котушками двох сусідніх стрижнів та ізоляцією зовнішньої котушки від стінки бака. До *поздовжньої ізоляції* відносять ізоляційні проміжки між витками, між шарами витків і між котушками однієї обмотки. Габарити головної та поздовжньої ізоляції при напругах до 220 кВ включно визначаються грозовими перенапругами. Конструкція ізоляції повинна забезпечувати охолодження активних частин трансформатора.

Головна ізоляція виконується переважно *маслобар'єрного типу*, що володіє високою імпульсною електричною міцністю та забезпечує інтенсивне охолодження обмоток і магнітопроводу. Ця ізоляція представляє собою трансформаторне масло з бар'єрами з електротехнічного картону. Загальний вид такої ізоляції показаний на рис. 8.1. Набір бар'єрів складають із трьох основних видів: циліндричний бар'єр, плоска шайба та кутова шайба.

Бар'єри розділяють один великий масляний проміжок на декілька менших, що збільшує загальну пробивну напругу. Для найбільшого ефекту бар'єри повинні розташовуватися перпендикулярно силовим лініям електричного поля.

Для забезпечення циркуляції масла та відводу тепла споруджують масляні канали двох основних видів (рис. 8.2):

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

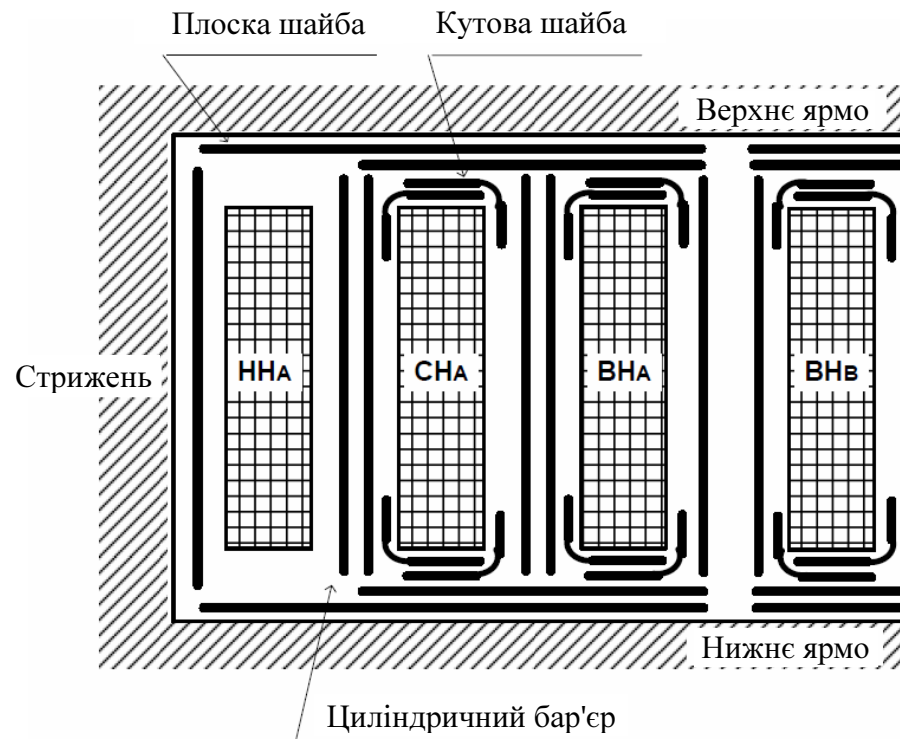


Рис. 8.1. Загальний вид головної ізоляції обмоток трансформаторів

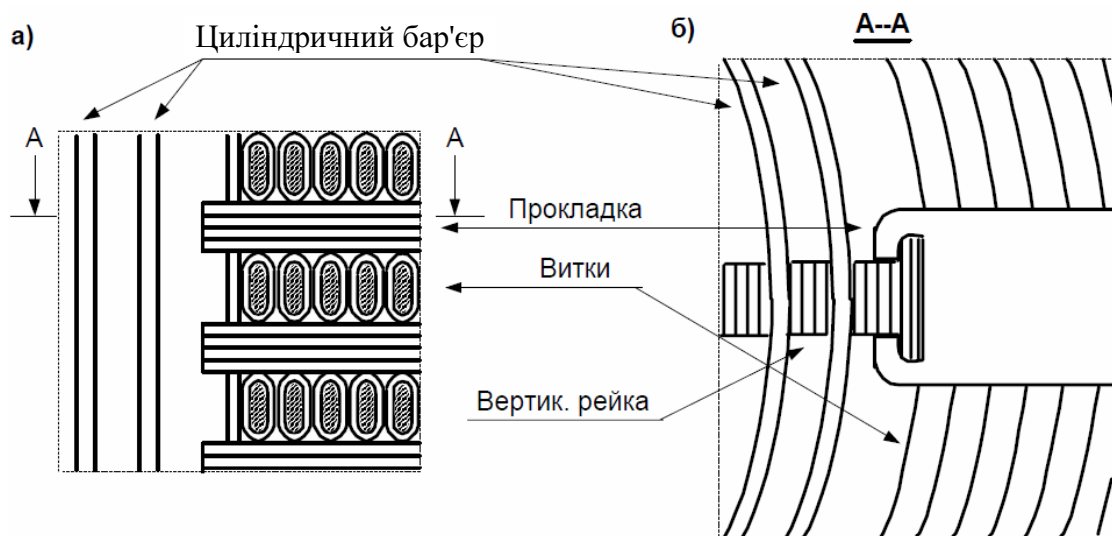


Рис. 8.2. Вертикальний (а) і горизонтальний (б) перетин масляних каналів

Характерна будова головної ізоляції трансформаторів напругою 35 кВ і 110 кВ показана на рис. 8.3.

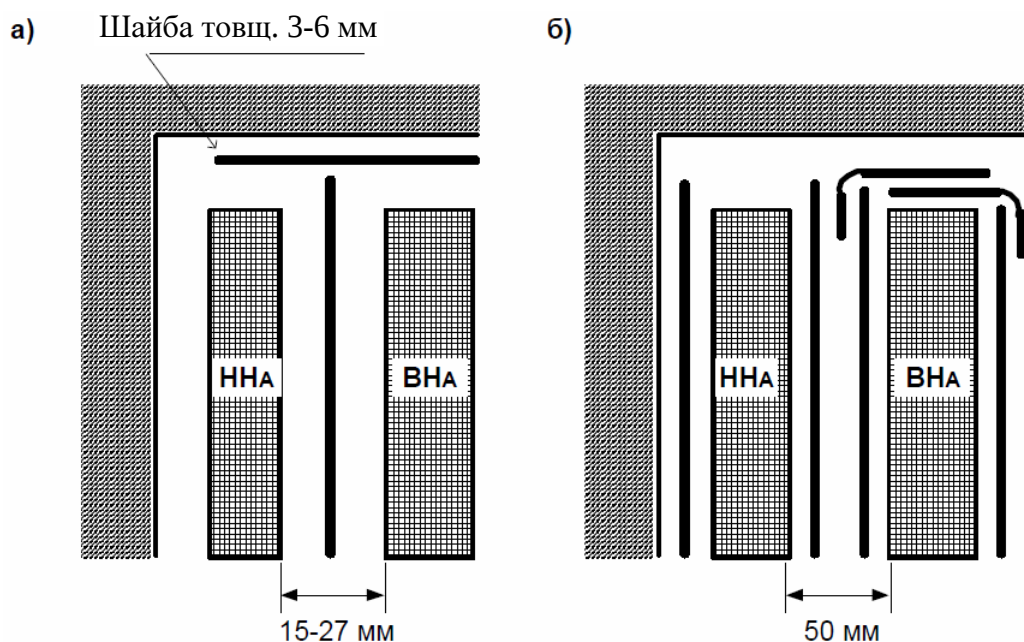


Рис. 8.3. Головна ізоляція трансформаторів 35 кВ (а) і 110 кВ (б)

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

Поздовжня ізоляція силових трансформаторів виконується звичайно шарами електроізоляційного паперу, що накладається поверх проводу.

У маслобар'єрної ізоляції **електрично найбільш навантаженими** виявляються прошарки масла, оскільки діелектрична проникність ϵ_r електрокартону становить приблизно 4, а в масла $\epsilon_r \approx 2.2$, до того ж електрична міцність масла в 3-4 рази менше електричної міцності просоченого електрокартону.

Порушення маслобар'єрної ізоляції починається із пробією масляного каналу без повного пробією ізоляції, при цьому в місці пробією утворюються незворотні ушкодження електрокартону або паперу, що знижують її електричну міцність. Щоб цього не відбувалося, у масляному каналі робочі напруженості електричного поля приймають від 2.5 кВ/мм до 5 кВ/мм у першому масляному каналі, де напруженість поля найбільша.

8.2. Ізоляція введів високої напруги

Прохідні ізолятори високої напруги, що називають інакше вводами, мають *несприятливе розташування електродів* з великою напруженістю електричного поля. Найбільша напруженість електричного поля спостерігається біля краю фланця ізолятора (рис. 8.4), де великі й нормальна до поверхні ізолятора складова напруженості електричного поля, і тангенціальна складова. У цьому місці можливе виникнення корони, ковзаючих розрядів, що призводять до перекриття та до радіальних пробоїв. Досить часто при експлуатації з'являються найбільш небезпечні *механічні навантаження на вигин* ізолятора. Крім того, на ізолятор впливають *теплові навантаження* за рахунок нагрівання струмоведучих частин та діелектричних втрат в ізоляційному тілі.

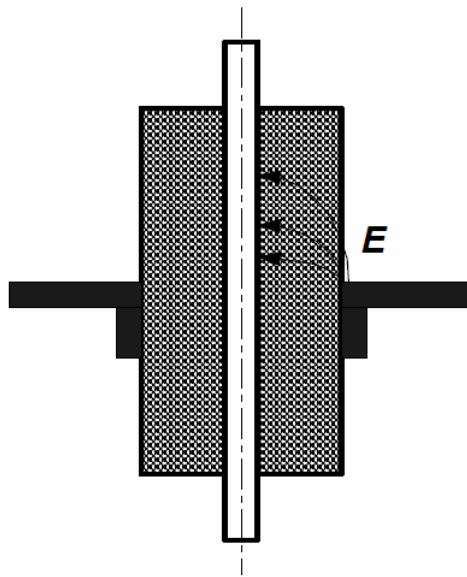


Рис. 8.4. Схематичне зображення прохідного ізолятора

Для створення більш рівномірного електричного поля використовуються конструкції *конденсаторного типу*, у яких необхідний розподіл напруги по ізоляційній конструкції примусово здійснюється за допомогою металевих обкладок, що закладають в ізоляцію в процесі її намотування (рис. 8.5). Така конструкція зменшує необхідні розміри введів, особливо його діаметр, що

поліпшує умови відводу тепла. Найчастіше ізолятори конденсаторного типу виконуються так, щоб забезпечити **сталість аксіальної** (поздовжньої) складової напруженості електричного поля. Для цього товщину шару ізоляції вибирають так, щоб забезпечити однакові ємності між обкладками та однакові напруги на кожному шарі; уступи також приймаються однаковими. Іноді, однак, виконують однакову товщину шарів.



Рис. 8.5. Ескіз прохідного ізолятора конденсаторного типу

По типу виконання ізоляції прохідні ізолятори діляться на суцільні фарфорові, паперово-бакелітові, маслобар'єрні та паперово-масляні (конденсаторного типу).

Для внутрішньої установки на напругу **до 35 кВ** використовуються **фарфорові армовані** прохідні ізолятори, всередині яких проходить струмоведучий стрижень, або **паперово-бакелітові** прохідні ізолятори конденсаторного типу. Паперово-бакелітові ізолятори виготовляють шляхом намотування паперу, просоченого бакелітовою смолою, з обкладками з металеві фольги, обжимаються та витримуються при температурі 160°C, при якій відбувається полімеризація смоли. Недоліками паперово-бакелітових

вводів є мала вологостійкість та наявність газових включень, тому на напруги вище 35 кВ їх не застосовують.

На напрузі 110 кВ і вище використовуються конденсаторні вводи з маслобар'єрною або паперово-масляною ізоляцією. У зв'язку з більш простою технологією виготовлення найпоширеніші останні. У цій конструкції на струмоведучий стрижень намотується ізоляція з кабельного паперу, а між шарами паперу закладаються металеві обкладки з алюмінієвої фольги. Папір висушується під вакуумом і просочується трансформаторним маслом. Зверху конструкція закривається фарфоровими покришками, укріпленими на металевому фланці. Простір усередині покришок заповнюється трансформаторним маслом.

Для підвищення теплової стійкості вводу збільшують площу перетину стрижня та поліпшують якість ізоляції зниженням тангенса кута діелектричних втрат.

8.3. Ізоляція силових конденсаторів

Силові конденсатори **застосовують** у наступних випадках:

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

Основна **характерна відмінність силових конденсаторів** від інших конденсаторів – порівняно великі струми, що протікають через них, які навіть при малих діелектричних втратах призводять до помітного нагрівання конденсаторів. **Основні проблеми**, що розв'язуються при проектуванні та виготовленні конденсаторів, полягають у забезпеченні необхідної ємності,

робочої напруги та теплової стійкості. Все це визначається ізоляцією конденсатора: діелектричною проникністю діелектрика, припустимою величиною робочої напруженості електричного поля, діелектричними втратами та умовами тепловідводу.

Силові конденсатори складаються *із секцій* в основному рулонного типу. Секції намотують на циліндричне оправлення та після зняття оправлення сплющують, або залишають на циліндричному ізоляційному каркасі, одержуючи циліндричну секцію. Залежно від номінальної напруги та ємності конденсатора його секції з'єднуються паралельно, послідовно або змішано (рис. 8.6). Пакет поміщають у корпус, просочують і герметизують для запобігання потрапляння повітря та вологи.

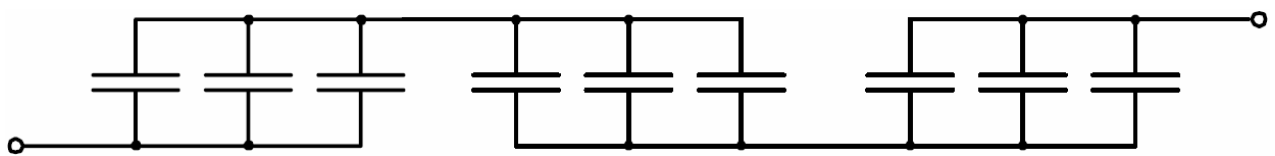


Рис. 8.6. Змішане паралельно-послідовне з'єднання секцій

Секції конденсаторів виконуються або *із прихованою, або з виступаючою фольгою* (рис. 8.7). Конструкцію з виступаючою фольгою застосовують для поліпшення тепловідводу та для зменшення індуктивності секцій. Для збільшення напруги застосовують *конструкцію з «сліпою» проміжною фольгою*, при цьому секція складається з декількох підсекцій, з'єднаних послідовно, а виводи мають тільки перша та остання фольга (рис. 8.7г).

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

Найбільш істотні характеристики конденсаторного паперу – її товщина (коливається від 4 до 30 мкм), щільність, кут діелектричних втрат (у просоченого паперу $\operatorname{tg} \delta = 0.0012 \dots 0.0026$) і електрична міцність, що сильно залежить від матеріалу просочення.

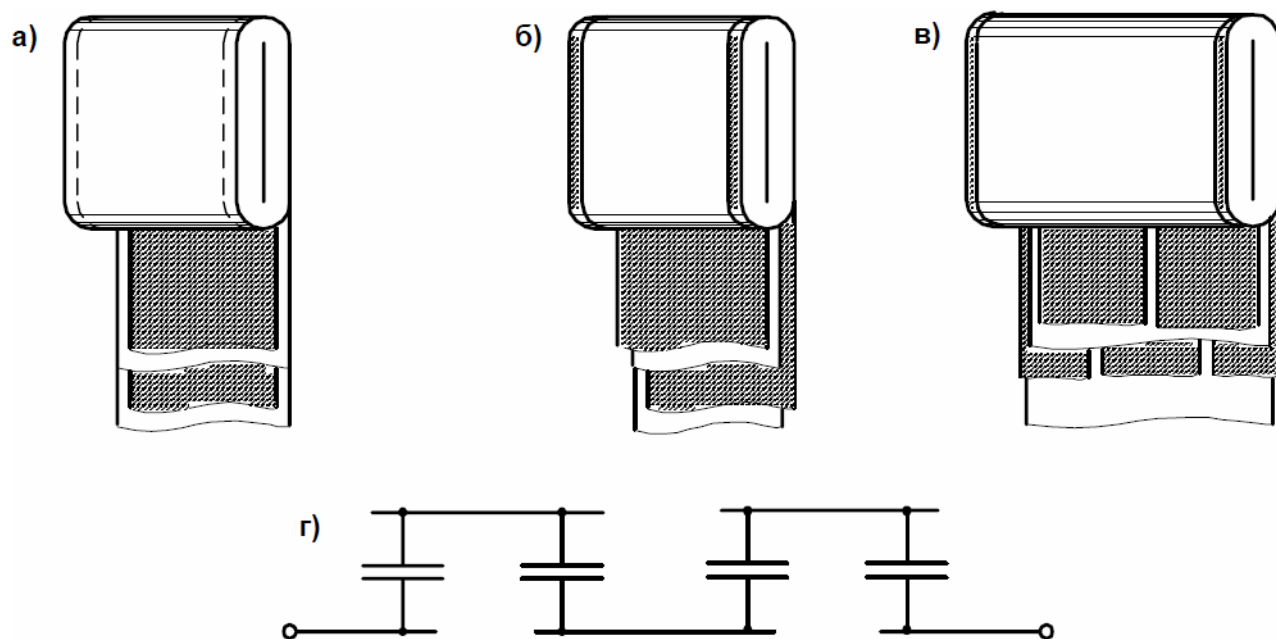


Рис. 8.7. Рулонні секції конденсаторів із прихованою фольгою (а), з виступаючою фольгою (б) та із проміжною «сліпою» фольгою (в)

З полімерних плівок у конденсаторах промислової та підвищеної частоти застосовують поліпропіленову плівку ($\epsilon_r = 2.25$, $\operatorname{tg} \delta = 0.0003$), а в імпульсних конденсаторах – лавсанову плівку ($\epsilon_r = 3.2$, $\operatorname{tg} \delta = 0.003$ при 50 Гц та $\operatorname{tg} \delta = 0.02$ при 1 МГц). У полімерних плівок висока електрична міцність, достатня термостійкість та механічна міцність, сумісність із рідкими діелектриками, що застосовуються для просочення.

У силових конденсаторах часто застосовують **комбіновану паперово-плівкову ізоляцію**, у якій шари конденсаторного паперу перемежуються із шарами полімерної плівки. Папір усмоктує рідину, втягуючи її в прошарки між плівками, і забезпечує відсутність газових включень. У такій ізоляції сприятливий розподіл напруженості електричного поля: у плівці напруженість приблизно вдвічі більше, ніж у папері, оскільки ϵ_r плівки приблизно вдвічі менше, а електрична міцність плівки вище.

Як просочення використовують нафтове конденсаторне масло, хлоровані дифеніли і їхні замінники, а в імпульсних конденсаторах – касторове масло. Хлоровані дифеніли мають більш високу діелектричну проникність у

порівнянні з конденсаторним маслом, високу стійкість до розкладання в електричному полі, негорючість, але токсичні та чутливі до домішок.

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

Робочі напруженості поля $E_{роб}$ в ізоляції паперово-масляних конденсаторів становлять 12...14 кВ/мм, при просоченні хлордифенілами або їхніми замінниками $E_{роб}$ зростають до 18...22 кВ/мм, але при цьому можливе неприпустиме нагрівання і кут втрат повинен бути малим. Паперово-поліпропіленовий діелектрик із двома шарами плівки ($\epsilon_r = 2.25$) і шаром паперу ($\epsilon_r = 4$) між ними допускає $E_{роб}$ від 18 кВ/мм і вище в паперовому компоненті залежно від просочення та до 50...60 кВ/мм у плівці. Конденсатори із чисто плівковим діелектриком допускають $E_{роб}$ до 50...60 кВ/мм, а в конденсаторах з використанням металізованої поліпропіленової плівки – до 70 кВ/мм. При підвищених частотах припустимі робочі напруженості поля визначаються в основному тепловим режимом. При постійній напрузі припустима робоча напруженість може досягати 80 кВ/мм.

8.4. Ізоляція силових кабелів

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

- одна або кілька струмопровідних жил;
- ізоляція;
- оболонка з алюмінію або свинцю для герметизації;
- броня зі сталевих стрічок або дротів для захисту від механічних ушкоджень;
- покриви зі стрічок кабельного паперу або пряжі, просочені бітумом, для захисту від корозії.

Ізоляція кабелю *розділяється* на фазну, між жилами, і поясну, між жилами та оболонкою.

Жили кабелю виготовляють із алюмінію або міді. Кабелі на напругу до 10 кВ включно виготовляють із секторними жилами, а на напругу 20 кВ і вище – із круглими жилами, звичайно з окремими екранами. Конструкція із секторними жилами забезпечує більш повне використання об'єму під металевою оболонкою, а круглі жили з екранами служать для забезпечення рівномірного радіально спрямованого електричного поля (рис. 8.8).

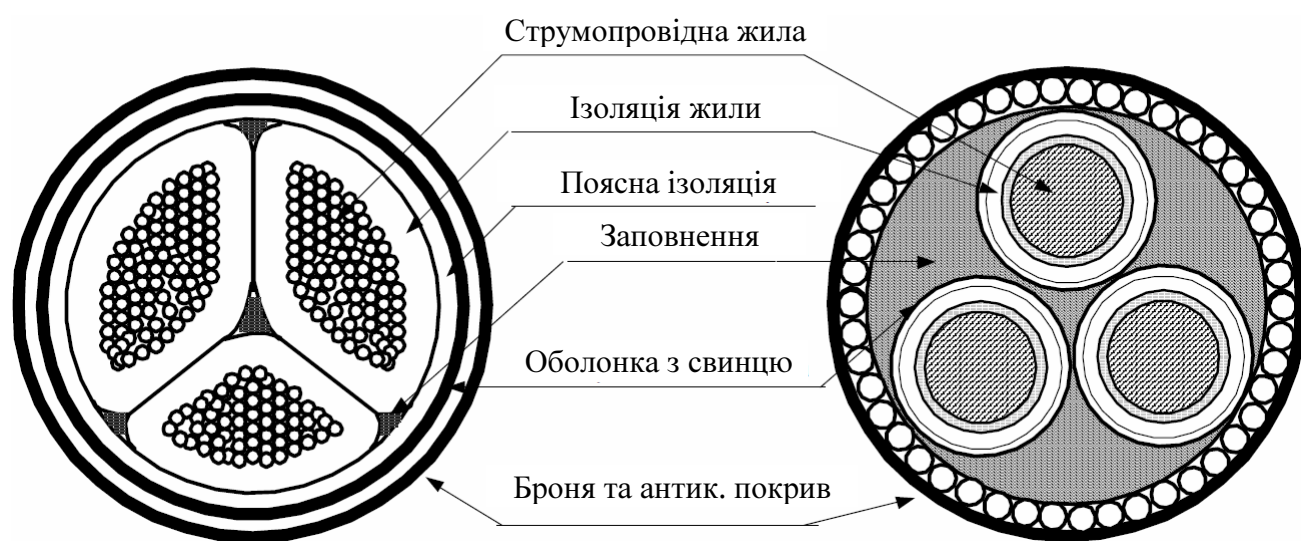


Рис. 8.8. Трьохжильні кабелі із в'язким просоченням

Ізоляція виконується або шарами кабельного паперу, просоченого в'язкими маслoканіфольними компаундами або кабельними маслами (нафтовими або синтетичними), або із пластмас. Кабельний папір товще конденсаторного, від 80 до 170 мкм. Шари паперу накладають так, щоб зазори шарів не збігалися. У високовольтних кабелях із пластмасовою ізоляцією переважно використовується поліетилен низької та високої щільності, іноді прошарки ізоляції виконують із фторопласта. Кабелі із пластмасовою ізоляцією виконуються на напруги до 400 кВ.

Кабелі із в'язким просоченням виготовляють на напруги не вище 35 кВ, оскільки при теплових рухах у такій ізоляції утворюються порожнечі, що

знижують робочі напруженості електричного поля. У *кабелях 110 кВ і вище* застосовується паперова ізоляція з менш в'язким просоченням і підтримкою надлишкового низького (до 0.5 МПа) або високого (до 1.5 МПа) тиску масла. Кабелі високого тиску в ряді випадків виконують у сталевому трубопроводі, кожна жила поверх ізоляції має окремий металевий екран.

8.5. Ізоляція електричних машин високої напруги

До електричних машин високої напруги *належать* турбогенератори, гідрогенератори, синхронні компенсатори, синхронні та асинхронні двигуни великої потужності з номінальними напругами 3 кВ і вище. Основною особливістю роботи ізоляції машин є тяжкі умови експлуатації: впливу перенапруг, високої робочої температури та перепадів температури, вібрації, ударних механічних впливів. Із цієї причини ізоляція машин повинна володіти високої нагрівостійкістю (класу не нижче В) і механічною міцністю.

В електричних машинах високої напруги ізоляцію обмоток статорів *розділяють на наступні види:*

- корпусна або головна ізоляція – між обмоткою та сталлю статора;
- міжфазна ізоляція – між обмотками різних фаз;
- виткова або поздовжня ізоляція – між витками однієї секції або між котушками;
- ізоляція елементарних провідників – між провідниками в одному витку або стрижні обмотки.

Виткова ізоляція *виконується* звичайно зі стеклослюдяної стрічки або на основі емальованих проводів зі скловолокнистою обмоткою, що просочені епоксидним компаундом. Головна ізоляція виконується на основі слюдяних ізоляційних матеріалів із забезпеченням відсутності газових прошарків. Струмоведауча частина стрижнів виконується прямокутної форми, і електричне поле в пазах неоднорідне. Для зниження неоднорідності поля кути стрижнів закруглюють або застосовують екрани (прокладки) з алюмінію.

Короткочасна електрична міцність корпусної ізоляції при товщинах від 3 до 12 мм характеризується на частоті 50 Гц середньою електричною міцністю 30...35 кВ/мм. Однак **робочі напруженості електричного** поля у зв'язку з нестабільністю характеристик вибираються на рівні 2...4 кВ/мм. При робочих напруженостях у високовольтних електричних машинах протягом тривалого часу існують часткові розряди помітної інтенсивності, які слабо впливають на надійність і довговічність ізоляції, оскільки слюда досить стабільна до впливу часткових розрядів.

Резюме

Ізоляція силових трансформаторів розділяється на зовнішню та внутрішню. Внутрішня ізоляція ділиться на головну та поздовжню. Головна ізоляція силових трансформаторів найчастіше виконується маслобар'єрного типу, а поздовжня ізоляція – шарами електроізоляційного паперу, що накладається поверх проводу.

Прохідні ізолятори високої напруги мають несприятливе розташування електродів, слабку механічну міцність на вигин та характеризуються нагріванням ізоляційного тіла ізолятора. Найпоширенішою конструкцією прохідного ізолятора є конденсаторний ввід.

Від силових конденсаторів потрібне забезпечення необхідної ємності, робочої напруги та теплової стійкості, що визначається ізоляцією конденсатора. Як ізоляція використовується просочений конденсаторний папір та полімерні плівки. Електродами в силових конденсаторах є алюмінієва фольга товщиною 7...12 мкм.

Ізоляція силових кабелів виконується або шарами кабельного паперу, просоченого в'язкими маслосланцевими компаундами або кабельними маслами (нафтовими або синтетичними), або із пластмас. У кабелях 110 кВ і вище застосовується паперова ізоляція з менш в'язким просоченням і підтримкою надлишкового низького або високого тиску масла.

У електричних машинах високої напруги ізоляцію обмоток статорів розділяють на головну ізоляцію, на міжфазну ізоляцію та на поздовжню ізоляцію.

Контрольні питання

1. Опишіть конструктивні особливості побудови ізоляції силових трансформаторів.
2. Як виконується ізоляція високовольтних вводів?
3. Яким чином улаштована ізоляція силових конденсаторів?
4. Який устрій силових кабелів, як виконана їхня ізоляція?

9. ВИПРОБУВАННЯ ІЗОЛЯЦІЇ

9.1. Дефекти ізоляції та механізми їх виникнення

У процесі експлуатації на ізоляцію впливають електричні, механічні та теплові навантаження, що спричиняють поступове погіршення її властивостей, що пов'язане зі зменшенням опору ізоляції, збільшенням діелектричних втрат, зниженням електричної міцності. Процес погіршення властивостей називають *старінням ізоляції*. Ці зміни носять, як правило, незворотній характер і завершуються пробоем ізоляції, що обмежує терміни служби ізоляційних конструкцій.

Розрізняють чотири основні види впливу на ізоляцію та *чотири процеси* старіння ізоляції:

- електричні навантаження, пов'язані з можливою іонізацією при великій напруженості електричного поля – електричне старіння ізоляції;
- теплові навантаження, що призводять до поступового розкладання або появи тріщин в ізоляції – теплове старіння ізоляції;
- механічні навантаження, що призводять до виникнення та розвитку тріщин у твердій ізоляції – механічне старіння;
- проникнення вологи з навколишнього середовища – зволоження ізоляції.

Дефекти, що виникають в ізоляції підрозділяються на *зосереджені* (тріщини, газові включення, ерозія, зволоження невеликого об'єму ізоляції) і *розподілені*, що охоплюють значний об'єм або поверхню ізоляції.

Електричне старіння твердої ізоляції відбувається через виникнення розрядних процесів у товщі ізоляції. Електричне старіння може мати місце при середній напруженості електричного поля на проміжку, набагато меншій (у 5...20 разів) короточасної електричної міцності ізоляції. Зі збільшенням напруги темпи електричного старіння зростають. Основною причиною електричного старіння внутрішньої ізоляції є *часткові розряди*, тобто такі

розрядні процеси в ізоляції, які поширюються лише на частину ізоляційного проміжку. Вони виникають в ослаблених місцях ізоляції: у газових включеннях, у місцях різкого посилення напруженості поля. Найбільшу небезпеку становлять часткові розряди в газових включеннях, тому що вони виникають при менших напругах, чим розряди в рідких або твердих компонентах твердої ізоляції. Остання обставина пов'язана з меншою діелектричною проникністю газового проміжку та відповідно більшою напруженістю електричного поля в ньому, а також з малою електричною міцністю газу в порівнянні із твердою або рідкою ізоляцією.

Закономірності розвитку часткових розрядів можна проілюструвати схемою заміщення, зображеною на рис. 9.1, де зображений газовий пузир у твердій ізоляції та схема заміщення ізоляції.

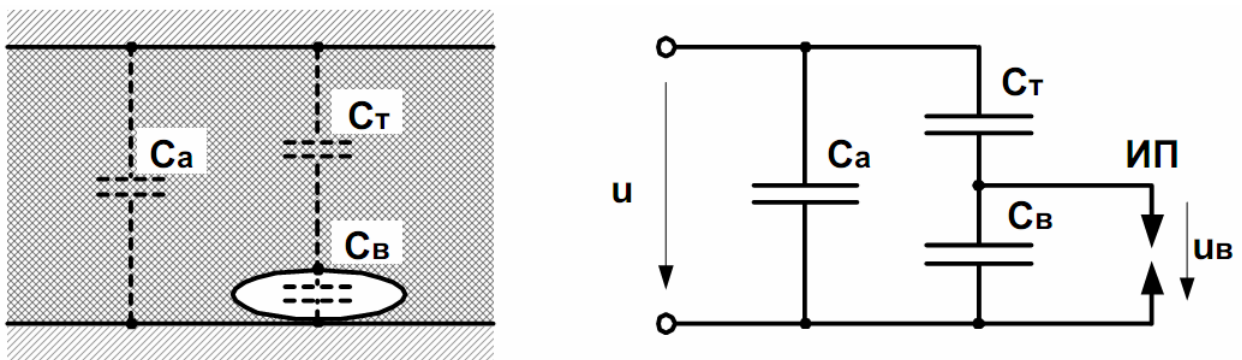


Рис. 9.1. Схема розвитку часткових розрядів у газовому включенні

На рис. 9.1 C_B – ємність газового включення, C_T – ємність частини ізоляції, включеної послідовно з газовим включенням, C_a – ємність масиву ізоляції, що залишився. При подачі на ізоляцію змінної напруги на повітряному включенні також буде змінна в часі напруга, що обумовлена ємнісним дільником:

$$u_B = u \frac{C_T}{C_T + C_B}, \quad (9.1)$$

і при досягненні цієї напругою пробивної напруги газового включення $U_{в-пр}$ відбувається пробій газового включення з різким зниженням напруги на ньому до рівня напруги гасіння $U_{в-г}$, яка менше пробивної напруги. Після цього, якщо напруга на всій ізоляції продовжує зростати, то знову починається збільшення напруги й на газовому включенні та може відбутися новий пробій, тобто в газовому включенні відбуваються багаторазові пробіи проміжку. Графічне зображення залежності напруг від часу показані на рис. 9.2 за умови подачі напруги в нульовий момент часу.

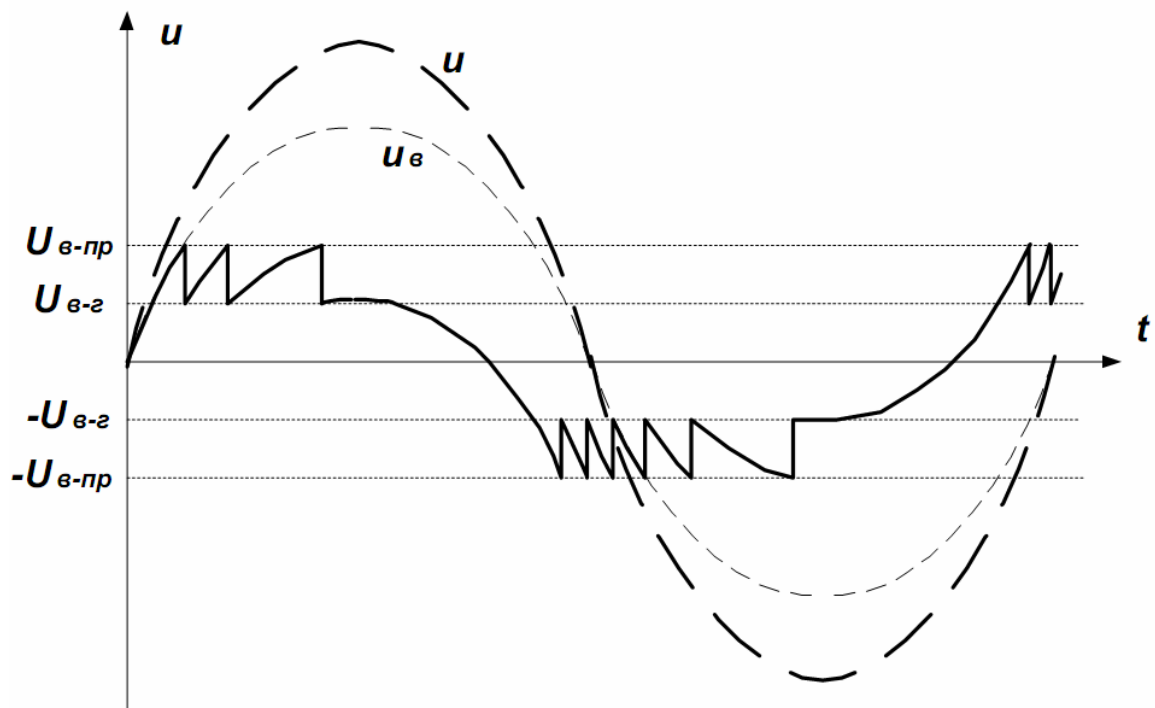


Рис. 9.2. Залежність напруг від часу при часткових розрядах

Під дією часткових розрядів відбувається поступове руйнування мікрооб'ємів ізоляції, розміри газового включення зростають у напрямку електричного поля, і цей процес завершується пробоем ізоляції.

При постійній напрузі інтенсивність часткових розрядів суттєво слабкіша, оскільки заряджання ємності газового включення C_B відбувається за рахунок струмів втрати через ізоляцію, які зазвичай набагато менше ємнісних струмів.

Ефективним засобом боротьби із частковими розрядами є просочення ізоляції. Заміна повітря рідким діелектриком з діелектричною проникністю $\epsilon_r > 1$ збільшує ємність C_B , знижуючи напругу на повітряному включенні; крім того, електрична міцність рідкого діелектрика суттєво більше електричної міцності газу.

Теплове старіння внутрішньої ізоляції виникає за рахунок прискорення різних хімічних реакцій при робочих температурах ізоляції, що зазвичай лежать у межах від 60°C до 130°C. Хімічні реакції призводять до поступової зміни структури та властивостей матеріалів і до погіршення ізоляції в цілому.

Для твердої ізоляції найбільш характерним є поступове зниження механічної міцності в процесі теплового старіння, що призводить до пошкодження ізоляції під дією механічних навантажень і потім до її пробою. У рідких діелектриках продукти розкладання забруднюють ізоляцію та знижують її електричну міцність. Для органічної ізоляції підвищення температури на 10°C знижує термін служби ізоляції вдвічі; у складній ізоляції силових трансформаторів процес теплового старіння протікає швидше, ніж за десятиградусним правилом.

Старіння ізоляції виникає і при механічних навантаженнях на тверду ізоляцію. Сутність цього виду старіння полягає в тому, що в навантаженому матеріалі виникає впорядкований рух локальних мікродефектів, і за рахунок цього утворюється та поступово збільшуються в розмірах мікротріщини. При дії сильних електричних полів у мікротріщинах виникають часткові розряди, що прискорюють руйнування ізоляції.

Зволоження ізоляції може розглядатися як одна з форм старіння ізоляції. Волога проникає в ізоляцію головним чином з навколишнього повітря. При цьому відбувається зменшення опору ізоляції, зростання діелектричних втрат, пов'язане з додатковим нагріванням ізоляції, що прискорює теплове старіння ізоляції. Нерівномірне зволоження, крім того, призводить до спотворення електричного поля та знижує пробивну напругу ізоляції.

Зволоження – процес загалом зворотній, волога може бути вилучена з ізоляції сушінням. Однак сушіння великогабаритних конструкцій вимагає виводу обладнання з експлуатації на тривалий час, а в ряді випадків видалення вологи з ізоляції утруднене або неможливе, наприклад, практично не піддається сушінню паперово-масляна ізоляція кабелів, вводів та іншого обладнання.

Для зниження зволоження застосовують герметизацію конструкцій, повітроосушники, гнучкі діафрагми та інші методи.

9.2. Основні види профілактичних випробувань ізоляції

Перелічені вище механізми старіння ізоляції не вичерпують всі фактори, що впливають на ізоляцію. Додатково на ізоляцію впливають забруднення, зовнішній перегрів, перенапруги, короткі замикання. Вплив цих факторів на характеристики ізоляції показано в табл. 9.1.

Класифікація методів діагностики та випробувань ізоляції проводиться за ознакою можливого руйнування ізоляції в процесі контролю та за ознакою застосування електричних методів.

За ознакою можливого руйнування ізоляції методи контролю ізоляції підрозділяються на три групи:

- неруйнуючі методи контролю, які виконуються при напругах, менших робочих, і засновані на явищах, що виникають у слабких електричних полях (електропровідність і поляризаційні явища) та пов'язаних із пробивною напругою ізоляції;
- неруйнуючі методи контролю, які виконуються при робочих напругах, – в основному це контроль часткових розрядів, а також тепловий і ультразвуковий контроль;

Таблиця 9.1 Зміна характеристик ізоляції залежно від факторів, що впливають

Фактор	Зміна
Зволоження	Зменшення опору; Збільшення ємності; Збільшення $\tan \delta$; Підвищення температури; Підвищення тиску у вводах; Зниження пробивної напруги трансформаторного масла; Зміна хімічного складу; Часткові розряди
Забруднення	Зменшення опору; Збільшення $\tan \delta$; Підвищення температури; Зниження пробивної напруги трансформаторного масла; Зміна хімічного складу; Часткові розряди
Перенапруги	Пробій ізоляції; Часткові розряди
Перегрів	Зменшення опору; Збільшення $\tan \delta$; Підвищення тиску у вводах; Зміна хімічного складу; Часткові розряди
Короткі замикання	Термічні та динамічні зовнішні впливи на ізоляцію

• руйнуючі методи контролю, пов'язані з використанням напруги, підвищеної в порівнянні з робочою напругою яка викликає прискорене руйнування ізоляції в дефектному місці; підвищена напруга не виключає появи дефекту, який може призвести до пробою ізоляції під час експлуатації.

За ознакою застосування електричних методів методи контролю підрозділяють на дві групи:

- електричні методи контролю ізоляції, які розглянуті далі;
- неелектричні методи контролю: хроматографічний аналіз газів у трансформаторному маслі, ультразвукові методи контролю, радіохвильовий метод, тепловізійний метод, оптикоелектронний метод, рентгенографічний метод.

Резюме

У процесі експлуатації ізоляції на неї впливають часткові розряди, теплові та механічні навантаження, з навколишнього повітря проникає волога. Все це призводить до появи зосереджених та розподілених дефектів ізоляції.

Методи контролю стану ізоляції підрозділяються на неруйнуючі методи, які виконуються при знижених напругах і при робочих напругах, та на руйнуючі методи контролю, що припускають використання напруг, підвищених у порівнянні з робочими.

Контрольні питання

1. У чому полягає сутність електричного старіння ізоляції?
2. Який механізм теплового старіння ізоляції?
3. Як відбувається механічне старіння ізоляції?
4. Наведіть класифікації методів контролю ізоляції.

10. ВИМІР ОПОРУ І ЄМНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ

10.1. Контроль опору ізоляції

Основна вимога до ізоляції зводиться до відсутності її нагрівання при робочій напрузі, і разом з тим від ізоляції потрібно не проводити струм при постійній напрузі. Вимір опору ізоляції є одним з найпростіших, але досить ефективних методів контролю стану ізоляції, що дозволяють фіксувати один з найпоширеніших дефектів ізоляції – її зволоження, що призводить до істотного нагрівання при змінній напрузі через збільшення наскрізної електропровідності діелектрика та збільшення поляризаційних втрат. Вимір опору ізоляції дозволяє контролювати як суцільне зволоження ізоляції, так і зволоження тільки одного із шарів у шаруватій ізоляції.

Опором ізоляції називають відношення напруги, прикладеної до ізоляції, до струму через перетин ізоляції, при прикладенні постійної напруги через 1 хв. після подачі напруги, тобто це – опір при постійній напрузі через 1 хв. після його подачі. Суцільне зволоження ізоляції призводить до зниження її опору через високу провідність води, що дозволяє по величині опору відразу судити про можливе її зволоження. Через наявність абсорбційних явищ струм через ізоляцію при прикладенні постійної напруги змінюється по величині протягом деякого часу порядку десятків секунд, тому опором ізоляції вважають її опір через 60 с. після прикладення напруги. Суть абсорбційних явищ – і одночасно можливість контролю шаруватого зволоження ізоляції – пояснює рис. 10.1, на якому зображена двошарова ізоляція та дві рівноправні еквівалентні схеми заміщення двошарової ізоляції.

Схема рис. 10.1б є природною схемою заміщення двошарової ізоляції, що враховує наскрізні струми через шари ізоляції та ємності шарів. Схема рис. 10.1в аналогічна схемі рис. 10.1б, якщо виконуються співвідношення наступного типу:

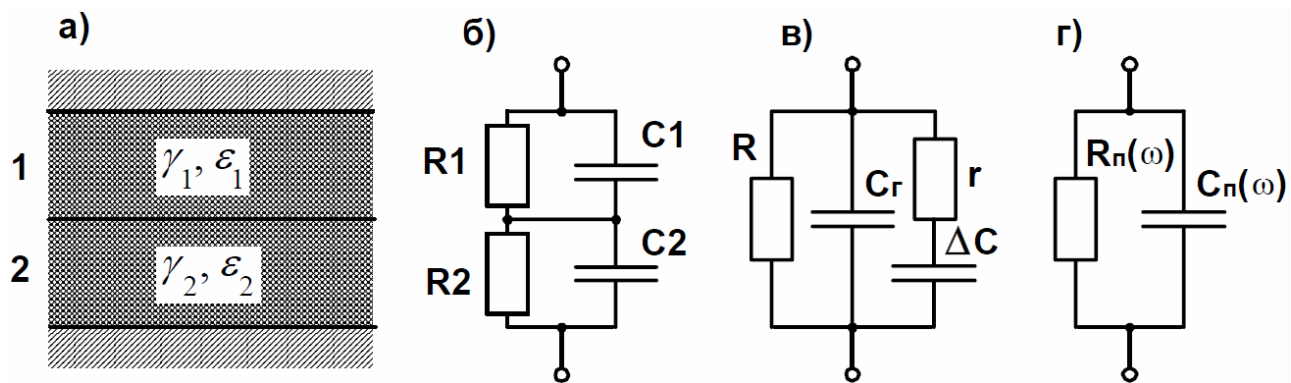


Рис. 10.1. Двошарова ізоляція та різні схеми її заміщення

$$R = R_1 + R_2, \quad C_{\Gamma} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2};$$

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

При подачі постійної напруги спочатку відбувається різкий стрибок напруги від нуля до сталого значення, при якому струм протікає тільки по ємнісних елементах (рис. 10.1б). Розподіл напруги визначається ємностями цих елементів. По закінченні деякого часу ємнісні елементи перестають грати яку-небудь роль і розподіл напруги по шарах визначається їхніми омичними опорами. Якщо величини опорів великі, то перезарядження ємнісних елементів триває досить довго, показання мегаомметра протягом деякого часу (десятки секунд) будуть змінюватися; хороша ізоляція без зволоження означає досить тривалий процес переходу в сталий режим. При зволоженні одного із шарів перезарядження через один з низькоомних елементів R_1 або R_2 пройде досить швидко, за час менш 15 с. Якщо навіть другий шар має великий опір (а при змінній напрузі низькоомний шар буде нагріватися ємнісними струмами високоомного шару), то за співвідношенням опорів, що виміряні у різні моменти часу (конкретно – через 60 с, R_{60} , і через 15 с, R_{15}), можна судити про зволоження одного із шарів.

Якщо знехтувати початковим стрибком струму, що заряджає геометричну

ємність C_T , то після прикладення постійної напруги струм через ізоляцію визначається сумою наскрізного струму через елемент R (рис. 10.1в) і струму заряду елемента ΔC :

$$i = \frac{U}{R} + \frac{U}{r} e^{-\frac{t}{T}},$$

звідки $R(t) = \frac{U}{i} = \frac{R}{1 + \frac{R}{r} e^{-\frac{t}{T}}}$ – опір двошарової ізоляції змінюється в часі, і

швидкість зміни вище, якщо хоча б один із шарів має невисокий опір (рис. 10.2); $T = r\Delta C$.

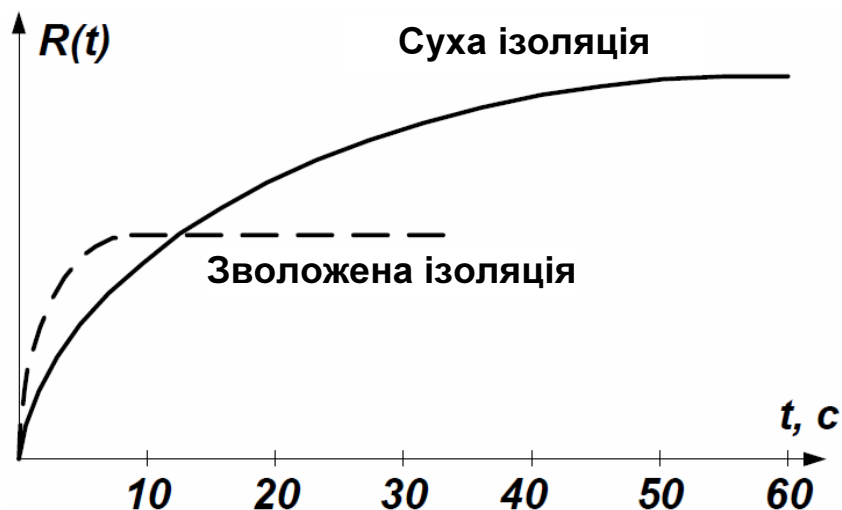


Рис. 10.2. Залежність опору від часу при сухій і зволоженій ізоляції

Таким чином, контролюючи величину R_{60} , можна судити про наявність суцільного зволоження ізоляції, а по відношенню $K_{abc} = R_{60}/R_{15}$, що називається коефіцієнтом абсорбції, можна судити про наявність зволоження одного із шарів ізоляції. Більш конкретно, якщо $K_{abc} < 1.3$, то, як це слідує з дослідних даних, ізоляція неприпустимо зволожена.

Коефіцієнт абсорбції є показником зволоження ізоляції при температурах нижче 35...40°C. При більш високій температурі зростає струм наскрізної провідності та коефіцієнт абсорбції і для сухої, і для вологої ізоляції наближаються до одиниці.

При вимірі опору ізоляції беруть до уваги насамперед абсолютну величину опору R_{60} , що повинна бути не менше нормованого значення, а потім і коефіцієнт абсорбції. Якщо обидві величини не виходять за межі норми, то говорять про те, що зволоження ізоляції не виявлено; якщо хоча б одна з величин незадовільна, то роблять висновок про неприпустиме зволоження ізоляції.

Потрібні значення опору ізоляції для різних установок представлені в правилах експлуатації електроустановок. Для силових трансформаторів значення опору ізоляції, що встановлюються нормами, залежать від температури обмоток; так, у трансформаторів з номінальною напругою обмотки вищої напруги 35 кВ при 20°C опір головної ізоляції повинен бути не менше 300 МОм, у трансформаторів 110 кВ – не менше 600 МОм. Оскільки ізоляція трансформаторів включає у свій склад ряд ізоляційних проміжків, для контролю характеристик ізоляції, включаючи і виміри опору, використовують нормативні схеми виміру. Перелік схем для двообмоткових і трьохобмоткових трансформаторів наведений у табл. 10.1.

Таблиця 10.1 – Схеми виміру характеристик ізоляції трансформаторів

Послідовність вимірів	Двообмоткові		Трьохобмоткові	
	Вимірювані обмотки	Частини, що заземлюють	Вимірювані обмотки	Частини, що заземлюють
1	НН	Бак, ВН	НН	Бак, СН, ВН
2	ВН	Бак, НН	СН	Бак, НН, ВН
3	(ВН+НН)*	Бак	ВН	Бак, НН, СН
4	—	—	(ВН+СН)*	Бак, НН
5	—	—	(ВН+СН+НН)*	Бак

*Виміри обов'язкові тільки для трансформаторів потужністю 16000 кВА та більше

Виміри опору ізоляції в експлуатації роблять мегаомметрами на напругу 0.5 кВ, 1 кВ або 2.5 кВ. Найпоширенішими є мегаомметри з вбудованими генераторами, що забезпечують автономну роботу; до такого типу належить мегаомметр М1102. Мегаомметри типу Ф4101, що дозволяють вимірювати опори до 50000 МОм, мають комбіноване живлення (від мережі та від сухих

елементів) і побудовані за послідовною схемою, у якій джерело напруги, вимірювальний елемент та ізоляція, що випробується включаються послідовно.

10.2. Контроль ємності ізоляції

Контроль величини ємності ізоляції дозволяє виявляти шарувате зволоження ізоляції. Ємність ідеального конденсатора не залежить від частоти; чим більше діелектричні втрати в реальному конденсаторі або в ізоляції, тим сильніше залежить від частоти ємність ідеального ємнісного елемента в схемі заміщення реального конденсатора.

Можна спробувати використати просту паралельну схему заміщення двошарової ізоляції (за рис. 10.1а) з паралельно з'єднаними резистивним елементом R_{II} і ємнісним елементом C_{II} (рис. 10.1г). При цьому, однак, значення параметрів схеми заміщення виявляються частотно-залежними; зокрема, $C_{II} = C_{\Gamma} + \frac{\Delta C}{1 + \omega^2 T^2}$, $T = r\Delta C$. Вид залежності $C_{II}(\omega)$ показаний на рис. 10.3. З ростом ступеня зволоження зростає розмах зміни ємності $C_{II}(\omega)$ зі зміною частоти. Використання цієї залежності може служити для виявлення шаруватого зволоження ізоляції.

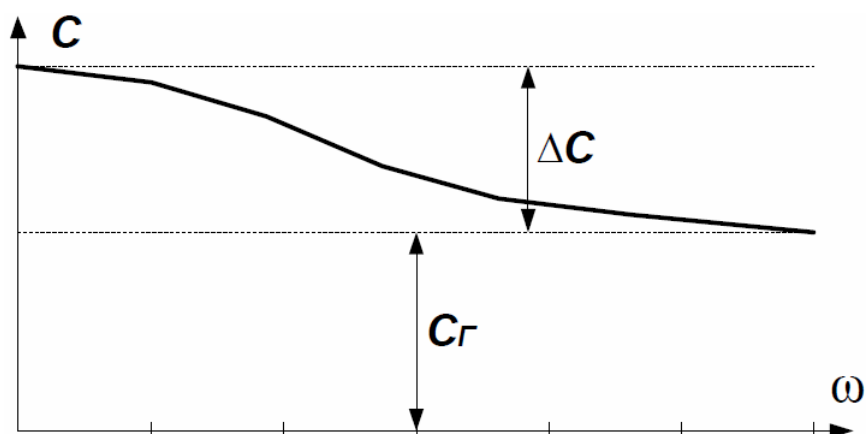


Рис. 10.3. Залежність ємності від частоти для двошарової ізоляції

Для оцінки стану ізоляції виміри роблять на частотах 2 Гц і 50 Гц при незмінній температурі ізоляції та потім визначають відношення C_2/C_{50} , що і

служить показником якості ізоляції. На підставі досліду встановлено, що ізоляція має неприпустиме зволоження, якщо $\frac{C_2}{C_{50}} > 1.3$.

Для виміру ємностей використовуються два основних принципи, що проілюстровані на рис. 10.4.

Перемикач у схемі (рис. 10.4а) періодично підключає ізоляцію, що випробовується до джерела постійної напруги, заряджаючи ємність ізоляції, а потім – до кола з гальванометром РА, через який ємність ізоляції розряджається. Середній струм через гальванометр визначається частотою перемикання, $I = UC(\omega)f$, так що при вимірюванні на частотах 2 Гц і 50 Гц відношення ємностей визначається відношенням струмів: $\frac{C_2}{C_{50}} = \frac{50I_2}{2I_{50}}$. За таким принципом працюють прилади контролю вологості серії ПКВ.

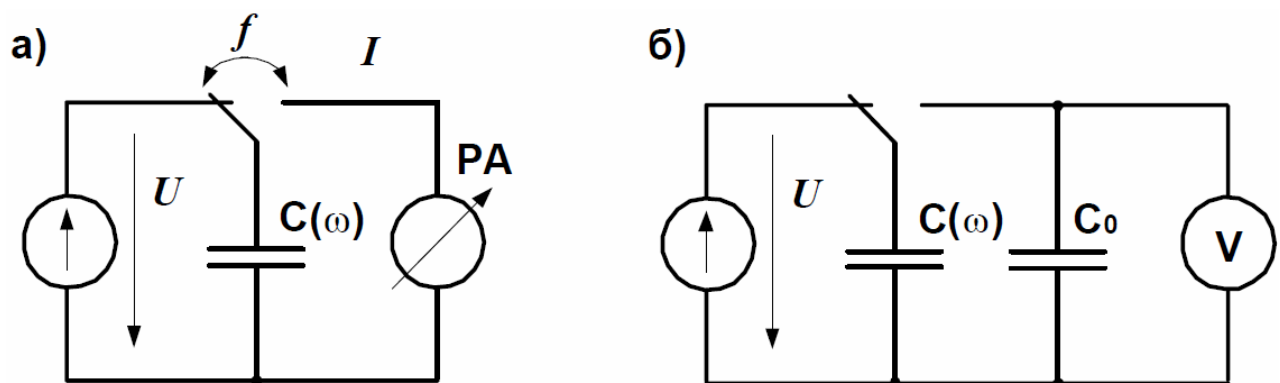


Рис. 10.4. Принциповий пристрій приладів ємнісного контролю зволоження

За схемою рис. 10.4б ізоляція, що випробовується заряджається від джерела постійної напруги, а потім на короткий час, приблизно на чверть періоду частоти 50 Гц, тобто на 5 мс, підключається до зразкового конденсатора C_0 . На зразковий конденсатор переноситься заряд, пропорційний ємності C_{50} (приблизно відповідний геометричній ємності C_T рис. 10.1в). Потім ізоляція знову заряджається, короткочасно замикається для розряду геометричної ємності та на час близько чверті періоду частоти 2 Гц (приблизно

130 мс) підключається до зразкового конденсатора для зняття частини заряду з абсорбційної ємності ΔC , що дозволяє визначити різницю $C_2 - C_{50}$. За цією різницею та за значенням C_{50} визначається відношення ємностей:

$$\frac{C_2}{C_{50}} = \frac{C_2 - C_{50}}{C_{50}} + 1.$$

Напруга на еталонному конденсаторі вимірюється за допомогою електронного вольтметра, що має великий вхідний опір. За цим принципом працюють прилади серії ПЕКІ та У-268.

10.3. Хроматографічний аналіз масла

При виникненні дефектів у маслонаповненої ізоляції (масляні трансформатори, маслонаповнені вводи) відбувається зміна фізичних характеристик і хімічного складу масла. Розподілені дефекти в такій ізоляції можуть бути виявлені при проведенні загального хімічного аналізу нафтового масла або при вимірі його електричної міцності та тангенса кута діелектричних втрат.

Останнім часом все більш широке поширення знаходить методика виявлення ушкоджень у силових трансформаторах за результатами аналізу розчинених у маслі газів. Ідея методу заснована на припущенні про те, що ушкодження в трансформаторі супроводжується виділенням різних газів, відсутніх у маслі при нормальній роботі. Ці гази спочатку розчиняються в маслі і у газове реле практично не попадають. Виділивши ці гази з масла та провівши їхній аналіз, можна виявити ушкодження на різних стадіях їхнього виникнення.

Відбір масла провадиться так, щоб виключити його дотику з навколишнім повітряним середовищем для запобігання втрат розчинених у маслі газів. Масло поміщається в замкнутий об'єм і газ над поверхнею масла піддається аналізу на хроматографі. Оцінка стану маслонаповненого устаткування здійснюється звичайно на базі наступних критеріїв:

- критерій граничних концентрацій (водень, метан, етилен, етан, ацетилен, окис і двоокис вуглецю та ін. гази); розкладання масла та

розкладання целюлози призводять до перевищення концентрацій різних газів, часткові розряди приводять до появи водню і т.п.;

- критерій швидкості наростання концентрацій газів – при щомісячному контролі;
- критерій відношення концентрацій газів – співвідношення концентрацій дозволяє виявляти перегрів та навіть температуру перегріву;
- критерій рівноваги – зіставлення результатів аналізу масла з газового реле та із проби.

Хроматографічний аналіз газів проводиться на комп'ютерних комплексах, що дозволяють автоматизувати аналіз критеріїв і розпізнавати дефекти, що з'являються, в устаткуванні до відмови встаткування.

Резюме

Вимір опору ізоляції дозволяє контролювати як суцільне зволоження ізоляції, так і зволоження тільки одного із шарів у шаруватій ізоляції. При вимірі опору ізоляції беруть до уваги насамперед абсолютну величину опору R_{60} , що повинна бути не менше нормованого значення, а потім і коефіцієнт абсорбції. Якщо обидві величини не виходять за межі норми, то говорять про те, що зволоження ізоляції не виявлено; якщо хоча б одна з величин незадовільна, то роблять висновок про неприпустиме зволоження ізоляції.

Контроль величини ємності ізоляції дозволяє виявляти шарувате зволоження ізоляції.

Для виявлення ушкоджень у силових трансформаторах використовується хроматографічний аналіз розчинених у маслі газів.

Контрольні питання

1. Які вимоги пред'являються до ізоляції?
2. Що називають опором ізоляції?
3. Чим відрізняється опір ізоляції від опору резистора?

4. До яких наслідків призводить зволоження ізоляції?
5. Яка методика контролю ізоляції виміром опору?
6. Яким способом проводиться контроль ізоляції виміром її ємності?

11. КОНТРОЛЬ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ВТРАТ І ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ

11.1. Контроль діелектричних втрат в ізоляції

Вимірювання $tg \delta$ вважається одним з основних методів контролю ізоляції електроустаткування високої напруги, оскільки розподілені дефекти (зволоження, іонізація газових включень) у першу чергу спричиняють збільшення діелектричних втрат. При вимірюваннях контролюють абсолютну величину $tg \delta$, зміни $tg \delta$ у порівнянні з попередніми вимірюваннями, а в деяких випадках, наприклад, для ізоляції електричних машин, знімають залежність $tg \delta(U)$, іноді й при підвищених напругах (до $2U_{НОМ}$). Вимірюване значення $tg \delta$ в порівнянні з нормативом дає уявлення про поточний стан ізоляції, характер зміни $tg \delta$ при періодичних вимірюваннях дозволяє судити про погіршення властивостей ізоляції в процесі експлуатації, а зростання $tg \delta$ при підвищенні напруги свідчить про часткові розряди в ізоляції. Вимірювання $tg \delta$ на високій напрузі здійснюють вимірювальними мостами змінного струму, побудованими за схемою Шерінга.

Принциповий пристрій чотирьохплечого високовольтного врівноваженого вимірювального моста змінного струму, виконаного за схемою Шерінга, показано на рис. 11.1.

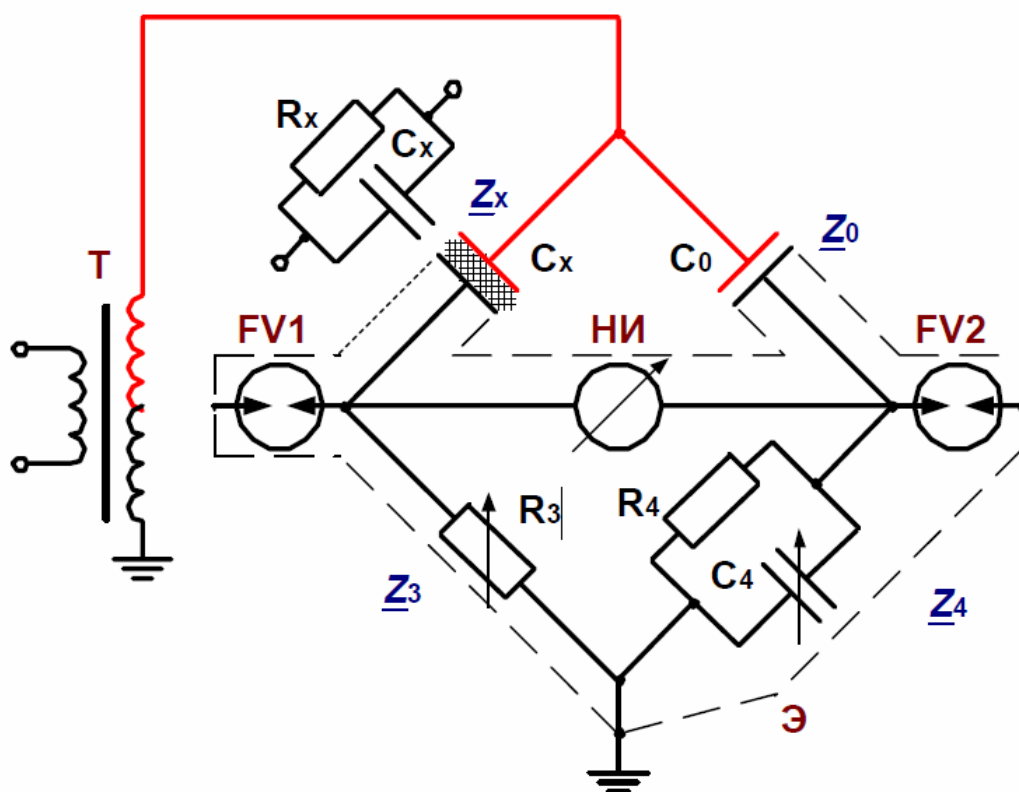


Рис. 11.1. Принциповий пристрій моста Шеринга

На рис. 11.1 C_x – ізоляція, що випробовується, яка заміщується паралельною схемою $C_x R_x$, C_0 – зразковий повітряний конденсатор, що має малі діелектричні втрати, R_3 – магазин ємностей (набір зразкових резисторів), R_4 – зразковий резистор, C_4 – магазин ємностей (набір зразкових конденсаторів). Літерою T позначений високовольтний трансформатор, що живить схему мосту, HI – нуль-індикатор, що служить для врівноважування мосту, $FV1$, $FV2$ – низьковольтні розрядники, що захищають низьковольтну частину мосту при пробі ізоляції, що випробовується, $\mathcal{E}$ – екран, роль якого пояснена далі при розгляді переверненої схеми мосту.

Особливостями мосту за схемою Шеринга є висока напруга живлення мосту та достатньо добра збіжність мосту при його врівноважуванні. Остання обставина для мосту змінного струму, що працює на синусоїдальній напрузі та потребує для збіжності вирівнювання модулів і фаз потенціалів на вимірювальній діагоналі мосту, має найважливіше значення.

Умовою рівноваги чотирьохплечого мосту, як відомо, є рівність добутків опорів протилежних плечей, тобто

$$\underline{Z}_X \underline{Z}_4 = \underline{Z}_0 \underline{Z}_3,$$

де
$$\underline{Z}_X = \frac{1}{\frac{1}{R_X} + j\omega C_X}, \quad \underline{Z}_4 = \frac{1}{\frac{1}{R_4} + j\omega C_4}, \quad \underline{Z}_0 = \frac{1}{j\omega C_0}, \quad \underline{Z}_3 = R_3.$$

Комплексне рівняння добутку опорів розпадається на два речових рівняння, з яких утворюються співвідношення для C_X та $\operatorname{tg} \delta$

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_4 R_4, \quad C_X = C_0 \frac{R_4}{R_3} \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}.$$

Якщо $\operatorname{tg} \delta < 0.1$, то $C_X = C_0 \frac{R_4}{R_3}$. При конкретному значенні R_4 шкалу магазину ємностей C_4 можна проградувати в одиницях $\operatorname{tg} \delta$.

В нормальній схемі мосту за рис. 11.1 обидва електрода ізоляції, що випробовується ізолювані від землі. Часто при здійсненні випробувань випробуваний об'єкт має заземлений електрод, який складно від'єднати від заземлених кіл, і в цих випадках для вимірювань використовується перевернена схема мосту Шеринга, зображена на рис. 11.2. При конкретному значенні R_4 шкалу магазину ємностей C_4 можна проградувати в одиницях $\operatorname{tg} \delta$.

У випадку переверненої схеми нижні елементи схеми перебувають під високим потенціалом. Оскільки всі ці елементи розташовані усередині заземленого корпусу, то на паразитних ємностях елементів по відношенню до корпусу є висока напруга, паразитні струми, що виникають через це призводять до неможливості вірного врівноважування мосту чутливим нуль-індикатором. Ця проблема вирішується установкою всередині заземленого корпусу додаткового екрана $\mathcal{E}$, з'єднаного з нижньою частиною мосту та має завжди той же потенціал, що й вимірювальні елементи мосту. При цьому на паразитних ємностях усередині екрана напруги і у нормальній, і в переверненій схемі завжди дуже невеликі.

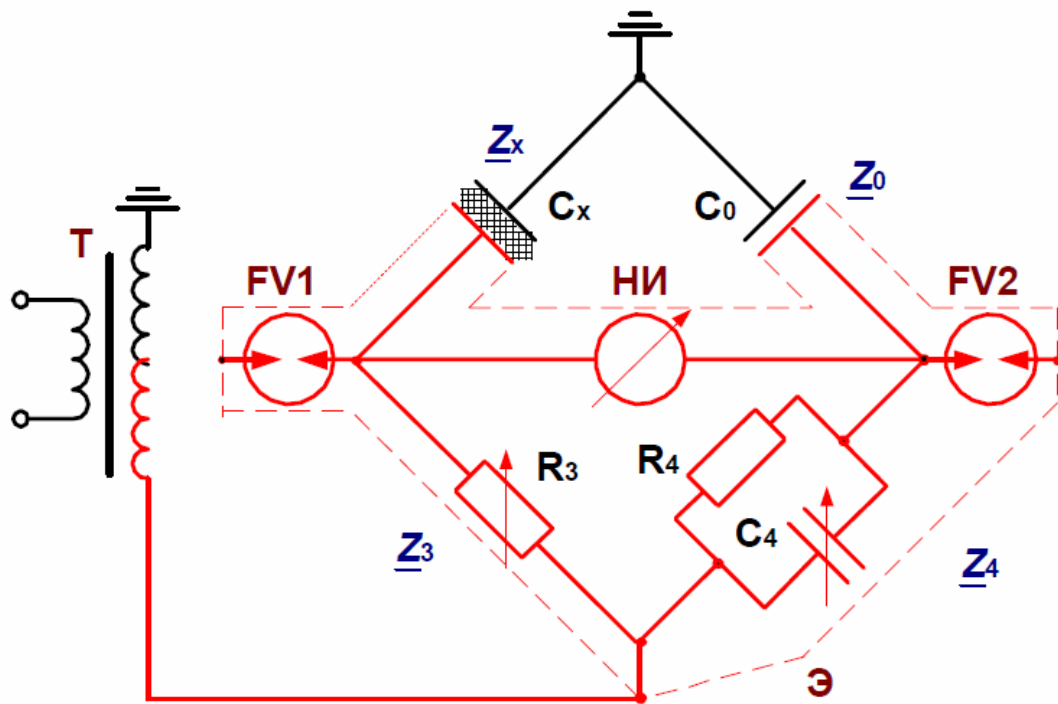


Рис. 11.2. Перевернена схема мосту Шеринга

Найпоширенішим приладом такого типу є міст Р5026, що дозволяє вимірювати ємності ізоляції від 10 пФ до 500 мкФ і тангенс кута втрат від 0.0001 до 1.0 з похибками порядку одиниць відсотків при напрузі 10 кВ. Нерідко зустрічаються старі модифікації цього мосту МД-16 і Р-595.

Для вимірювання кута втрат тарілчастих ізоляторів існує прилад ИТП-1, що дозволяє вимірювати $\operatorname{tg} \delta$ у межах 0.002...0.4 при напрузі 1.5 кВ на частоті 12.5 Гц, що забезпечує високу перешкодозахищеність вимірів.

11.2. Контроль часткових розрядів

Виявлення часткових розрядів засноване на реєстрації їх зовнішніх проявів. Найбільше поширення отримав електричний метод, сутність якого полягає в реєстрації стрибка напруги на ізоляції Δu , що відбувається при частковому розряді. Стрибок напруги відбувається за час порядку $10^{-7} \dots 10^{-8}$ с, і пропорційний енергії часткового розряду.

На рис. 11.3 показана схема установки для вимірювання параметрів

часткових розрядів. Установа містить високовольтний трансформатор T , випробувальний об'єкт C_x , конденсатор зв'язку C_0 , вимірювальний шунт Z (резистор або котушка індуктивності), загороджувальний фільтр низьких частот, підсилювач-дискримінатор, осцилограф і лічильник імпульсів. Така схема реєструє стрибкоподібне зниження напруги на випробувальній ізоляції при кожному частковому розряді (при дуже короткому імпульсі часткового розряду напруга падає на індуктивності розсіювання трансформатора) та частоту проходження розрядів. C_{BX} – ємність входних ланцюгів вимірювальної частини установки. Якщо $C_{BX} \ll C_0$, а $C_0 \ll C_x$, то стрибок напруги на вході вимірювальної частини практично дорівнює стрибку напруги на випробувальній ізоляції.

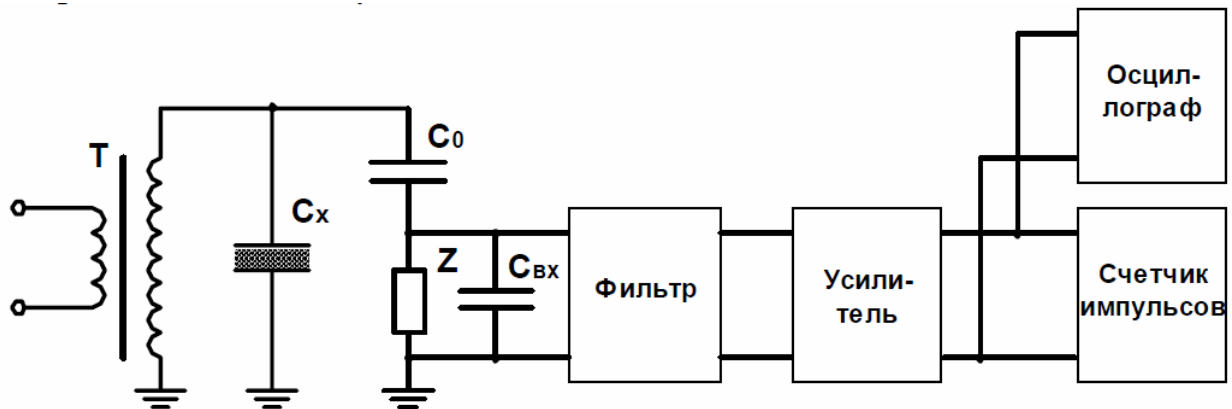


Рис. 11.3. Принцип роботи установки контролю часткових розрядів

За міру інтенсивності одиничного часткового розряду приймають так званий заряд, що здається $q = \Delta U C_x$, а інтенсивність багатократних часткових розрядів визначається *середнім струмом часткових розрядів* $I_{cp} = n_f q$, де n_f – число імпульсів за 1 с. Оскільки імпульси різні за амплітудою, використовується підсилювач-дискримінатор, що поділяє імпульси за амплітудою, і далі підраховуються імпульси кожного рівня, так що

$$I_{cp} = \sum_{i=1}^k (n_f q)_i.$$

Дослідним шляхом встановлене, що при $q = 10^{-16} \dots 10^{-14}$ Кл відбувається

відносно повільне старіння ізоляції, а при $q = 10^{-9} \dots 10^{-6}$ Кл ізоляція руйнується за дуже короткий час і такі часткові розряди неприпустимі навіть при випробуваннях підвищеною напругою.

Резюме

Вимірювання $\operatorname{tg} \delta$ – це один з основних методів контролю ізоляції електроустаткування високої напруги. При вимірюваннях контролюють абсолютну величину $\operatorname{tg} \delta$, зміни $\operatorname{tg} \delta$ в порівнянні з попередніми вимірюваннями, а в деяких випадках знімають залежність $\operatorname{tg} \delta$ від напруги. Для вимірювання використовують високовольтний вимірювальний міст за схемою Шеринга.

Контроль часткових розрядів дозволяє судити про темпи електричного старіння ізоляції. В електричному методі контролю ЧР реєструють стрибок напруги на ізоляції та величину заряду, що здається.

Контрольні питання

1. Які властивості ізоляції характеризує кут діелектричних втрат?
2. Як проводять контроль ізоляції вимірюванням кута діелектричних втрат?
3. Що означає назва «чотирьохплечий врівноважений міст змінного струму за схемою Шеринга»?
4. Поясніть принцип роботи мосту Шеринга та можливості вимірювання кута діелектричних втрат. Запишіть рівняння рівноваги мосту.
5. Навіщо і яким методом контролюють часткові розряди в ізоляції?

12. КОНТРОЛЬ ПІДВИЩЕНОЮ НАПРУГОЮ. ВИПРОБУВАННЯ ІЗОЛЯЦІЇ ОКРЕМИХ ВИДІВ ОБЛАДНАННЯ

12.1. Випробування ізоляції підвищеною напругою

Випробування ізоляції підвищеною напругою дозволяють виявити *локальні дефекти, які не виявляються іншими методами*; крім того, такий метод випробувань є прямим методом контролю здатності ізоляції витримувати впливи перенапруг і дає певну впевненість в якості ізоляції. До ізоляції прикладається випробувальна напруга, що перевищує робочу напругу, і нормальна ізоляція витримує випробування, а дефектна пробивається.

При профілактичних або післяремонтних випробуваннях перевіряється здатність ізоляції проробити без відмови до наступних чергових випробувань. Контроль ізоляції підвищеною напругою дає тільки непряму оцінку тривалої електричної міцності ізоляції, і основне його завдання – перевірка відсутності грубих зосереджених дефектів.

Випробувальні напруги *для нового обладнання* на заводах-виробниках визначає ДСТ 1516.2-97, а *при профілактичних випробуваннях* величини випробувальних напруг приймаються на 10-15% нижче заводських норм. Цим зниженням враховується старіння ізоляції та послаблюється небезпека накопичення дефектів, що виникають при випробуваннях.

Контроль ізоляції підвищеною напругою в умовах експлуатації проводиться тільки для деяких видів обладнання (обертові машини, силові кабелі) з номінальною напругою *не вище 35 кВ*, оскільки при більш високих напругах випробувальні установки занадто громіздкі.

При випробуваннях підвищеною напругою використовуються три основних види випробувальних напруг: підвищена напруга промислової частоти, випрямлена постійна напруга та імпульсна випробувальна напруга (стандартні грозові імпульси).

Основним видом випробувальної напруги є *напруга промислової*

частоти. Час прикладення такої напруги – 1 хв. Ізоляція вважається такою, що витримала випробування, якщо за цей час не спостерігалось пробою або часткових ушкоджень ізоляції. У деяких випадках проводять випробування напругою підвищеної частоти (звичайно 100 або 250 Гц).

При великій ємності ізоляції, що випробовується (при випробуванні кабелів, конденсаторів) потрібне застосування випробувальних апаратів великої потужності, тому такі об'єкти найчастіше випробовуються **підвищеною постійною напругою**. Як правило, при постійній напрузі діелектричні втрати в ізоляції, що призводять до її нагрівання, на кілька порядків нижче, ніж при змінній напрузі такого ж ефективного значення; крім того, і інтенсивність часткових розрядів набагато нижче. При таких випробуваннях навантаження на ізоляцію істотно менше, ніж при випробуваннях змінною напругою, тому для пробою дефектної ізоляції потрібно більш висока постійна напруга, ніж випробувальна змінна напруга.

При випробуваннях постійною напругою додатково контролюється струм витоку через ізоляцію. Час прикладення постійної випробувальної напруги становить від 5 до 15 хв. Ізоляція вважається такою, що витримала випробування, якщо вона не пробилася, а значення струму витоку до кінця випробувань не змінилося або знизилося.

Недолік постійної випробувальної напруги полягає в тому, що ця напруга розподіляється по товщі ізоляції відповідно до опорів шарів, а не відповідно до ємностей шарів, як при робочій напрузі або при перенапрузі. Із цієї причини відношення випробувальних напруг до робочих напруг окремих шарів ізоляції виходять істотно різними.

Третім видом випробувальної напруги є **стандартні грозові імпульси** напруги із фронтом 1.2 мкс та тривалістю до напівспаду 50 мкс. Випробування імпульсною напругою роблять тому, що ізоляція в процесі експлуатації піддається впливу грозових перенапруг зі схожими характеристиками. Вплив грозових імпульсів на ізоляцію відрізняється від впливу напруги частотою 50 Гц через набагато більшу швидкість зміни напруги, що призводить до

іншого розподілу напруги по складній ізоляції типу ізоляції трансформаторів; крім того, сам процес пробою при малих часах відрізняється від процесу пробою на частоті 50 Гц, що описується вольт-секундними характеристиками. Із цих причин випробувань напругою промислової частоти в ряді випадків виявляється недостатньо.

Вплив грозових перенапруг на ізоляцію часто супроводжується спрацьовуванням захисних розрядників, що зрізують хвилю перенапруги через кілька мікросекунд після її початку, і тому при випробуваннях використовують також імпульси, зрізані через 2-3 мкс після початку імпульсу (*зрізані стандартні грозові імпульси*).

Амплітуда імпульсу вибирається виходячи з можливостей обладнання, що захищає ізоляцію від перенапруг, з деякими запасами, і виходячи з можливості накопичення прихованих дефектів при багаторазовому впливі імпульсних напруг. Конкретні величини випробувальних імпульсів визначаються за ДСТ 1516.1-76.

Випробування *внутрішньої ізоляції* проводять триударним методом. На об'єкт подається по три імпульси позитивної й негативної полярності, спочатку повні, а потім зрізані. Інтервал часу між імпульсами – не менш 1 хв. Ізоляція вважається такою, що витримала випробування, якщо під час випробування не відбулося її пробоїв і не виявлено ушкоджень. Методика виявлення ушкоджень досить складна та звичайно проводиться осцилографічними методами.

Зовнішня ізоляція обладнання випробовується 15-ударним методом, коли до об'єкта з інтервалом не менш 1 хв. прикладається по 15 імпульсів обох полярностей, як повних, так і зрізаних. Ізоляція вважається такою, що витримала випробування, якщо в кожній серії з 15 імпульсів було не більше двох повних розрядів (перекриттів).

12.2. Випробування ізоляції кабелів, трансформаторів і високовольтних вводів

Всі види випробувань можна розділити на три основні групи, що розрізняються за призначенням й, відповідно, за об'ємом та нормами:

- випробування нових виробів на заводі-виготовлювачі;
- випробування після прокладки або монтажу нового обладнання, випробування після капітального ремонту;
- періодичні профілактичні випробування.

Вимоги по випробуваннях ізоляції кабелів, трансформаторів і високовольтних вводів викладаються окремо для цих трьох груп випробувань.

1. Кабелі

Випробувальні напруги для кабелів встановлюються відповідно до очікуваного рівня внутрішніх і грозових перенапруг.

На заводах-виробниках маслонаповнені кабелі й кабелі з малов'язким просоченням випробовують підвищеною напругою промислової частоти (біля $2,5U_{ном}$). Кабелі із в'язким просоченням і газові кабелі для запобігання ушкодження ізоляції випробовують випрямленою напругою порядку $(3,5...4)U_{ном}$, причому $U_{ном}$ – лінійна при робочих напругах 35 кВ і менш і фазна при робочих напругах 110 кВ і більше.

Крім того, вимірюють опір ізоляції, а при робочих напругах 6 кВ і більше вимірюють опір ізоляції та $tg\delta$ (останній – при напругах від $0,5U_{ном}$ до $2U_{ном}$).

Після прокладки кабелю, після капітального ремонту та під час профілактичних випробувань ізоляцію кабелів випробовують підвищеною випрямленою напругою. Час випробувань для кабелів напругою 3...35 кВ становить 10 хв для кабелю після прокладки та 5 хв після капітального ремонту й під час профілактичних випробувань. Для кабелів напругою 110 кВ час прикладення випробувальної напруги – по 15 хв на фазу. Періодичність профілактичних випробувань становить від двох разів у рік до 1 раза в три роки для різних кабелів. При випробуваннях *контролюється струм витоку*,

значення якого лежать у межах від 150 до 800 мкА/км для нормальної ізоляції. До та після випробувань вимірюється *опір ізоляції*.

2. Силові трансформатори

На заводі-виготовлювачі внутрішня й зовнішня ізоляція випробовуються повними і зрізаними *стандартними грозовими імпульсами*, а також змінною напругою. Виявлення ушкоджень поздовжньої ізоляції найчастіше проводять осцилографуванням струму в нейтралі трансформатора й порівнянням осцилограми з типовою.

Якщо ізоляція нейтралі й лінійного виводу однакові, то при *випробуваннях змінною напругою* обидва кінці обмотки, що випробовується ізолюються і на обмотку подається напруга від стороннього джерела. Якщо рівень ізоляції нейтралі знижений, то випробування проводяться індукованою напругою підвищеної частоти (до 400 Гц) для того, щоб можна було б подавати напругу порядку $2U_{ном}$. Нейтраль при цьому заземлюється або на неї подається стороння напруга тієї ж частоти. Оскільки ЕРС самоіндукції в обмотці пропорційна частоті, $E = \omega B S w$, то без насичення сердечника, тобто при тій же максимальній індукції B , можна прикласти підвищену в порівнянні з робочою випробувальну напругу.

Крім випробувань підвищеною напругою вимірюється $tg\delta$, *опір ізоляції, ємнісні характеристики ізоляції*, а отримані на заводі значення використовуються в експлуатації як характеристики вихідного стану ізоляції.

При випробуваннях ізоляції повинна бути випробувана по черзі кожне електрично незалежне коло або паралельна вітка (в останньому випадку – при наявності повної ізоляції між вітками), а випробувальна напруга прикладається між виводом і заземленим корпусом, всі інші обмотки заземлюються. Виміри опору ізоляції проводять до і після випробувань підвищеною напругою. Схеми контролю ізоляції двохобмоточних і трьохобмоточних трансформаторів наведені в табл. 10.1.

Перед першим включенням знову змонтованого трансформатора вимірюють пробивну напругу трансформаторного масла, опір ізоляції та

коефіцієнт абсорбції, відношення C_2/C_{50} , $tg\delta$ (значення якого порівнюють із результатами заводських випробувань).

Під час періодичних профілактичних випробувань проводять ті ж випробування, що й перед першим включенням, але припустимі значення $tg\delta$ при цьому збільшені. Випробування ізоляції підвищеною напругою при профілактичних випробуваннях передбачаються для обмоток напругою 35 кВ і нижче, значення випробувальних напруг при цьому знижуються до 0,85-0,9 значення заводської випробувальної напруги.

Періодичність профілактичних випробувань для різних трансформаторів коливається від 1 разу в рік до 1 разу в 4 роки.

3. Вводи високої напруги

Основний вид контролю – *періодичний огляд* (від одного разу на три доби до одного разу в шість місяців). У вводи напругою 110-220 кВ за допомогою спеціального вимірювального конденсатора вимірюють $tg\delta$ і проводять *аналіз і випробування проб масла*, вимірюють *опір ізоляції* між спеціальною вимірювальною обкладкою вводу та сполучною втулкою. *Періодичність* таких випробувань для різних вводів різна, але не рідше одного разу в 4 роки.

Резюме

Випробування ізоляції підвищеною напругою дозволяють виявити локальні дефекти, які не виявляються іншими методами. Цей метод випробувань є прямим способом контролю здатності ізоляції витримувати вплив перенапруг. При випробуваннях підвищеною напругою використовуються три основних види випробувальних напруг: підвищена напруга промислової частоти, випрямлена постійна напруга та імпульсна випробувальна напруга.

Всі види випробувань діляться на три основні групи: випробування нових виробів на заводі-виготовлювачі, випробування після прокладки або монтажу

нового обладнання та після капітального ремонту, періодичні профілактичні випробування.

Ізоляцію кабелів випробовують підвищеною напругою, вимірюють опір ізоляції, а у деяких випадках вимірюють $\operatorname{tg}\delta$ ізоляції.

У силових трансформаторів вимірюють пробивну напругу трансформаторного масла, опір ізоляції та коефіцієнт абсорбції, відношення C_2/C_{50} , $\operatorname{tg}\delta$, проводять випробування підвищеною напругою для обмоток напругою 35 кВ і нижче. На заводі-виготовлювачі внутрішня та зовнішня ізоляція випробовуються повними та зрізаними стандартними грозовими імпульсами, а також змінною напругою.

Основний вид контролю вводів високої напруги – періодичний огляд. У вводів напругою 110-220 кВ вимірюють $\operatorname{tg}\delta$ і проводять аналіз і випробування проб масла та вимір опору ізоляції.

Контрольні питання

1. Навіщо випробовують ізоляцію електрообладнання підвищеною напругою?
2. Назвіть основні види випробувальних напруг і їхні особливості.
3. Які основні принципи випробувань ізоляції змінною напругою?
4. Як випробовують ізоляцію випрямленою напругою?
5. Яка методика випробувань ізоляції імпульсною напругою?

13. ВИПРОБУВАЛЬНІ УСТАНОВКИ ВИСОКОЇ ЗМІННОЇ ТА ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ

13.1. Випробувальні установки високої змінної напруги

Випробувальні установки високої змінної напруги призначені для одержання високої регульованої змінної напруги, за допомогою якої випробовують ізоляцію підвищеною напругою.

Основним вузлом установки є *випробувальний трансформатор*, що відрізняється від силового трансформатора аналогічного класу напруги малою потужністю, обмеженим часом включення, малим запасом електричної міцності ізоляції. Випробувальні трансформатори мають великий коефіцієнт трансформації та значну індуктивність розсіювання. Випробувальні трансформатори здебільшого є однофазними й виконуються в трьох модифікаціях: у ізолювальному корпусі, у металевому корпусі з одним вводом і в металевому корпусі із двома входами.

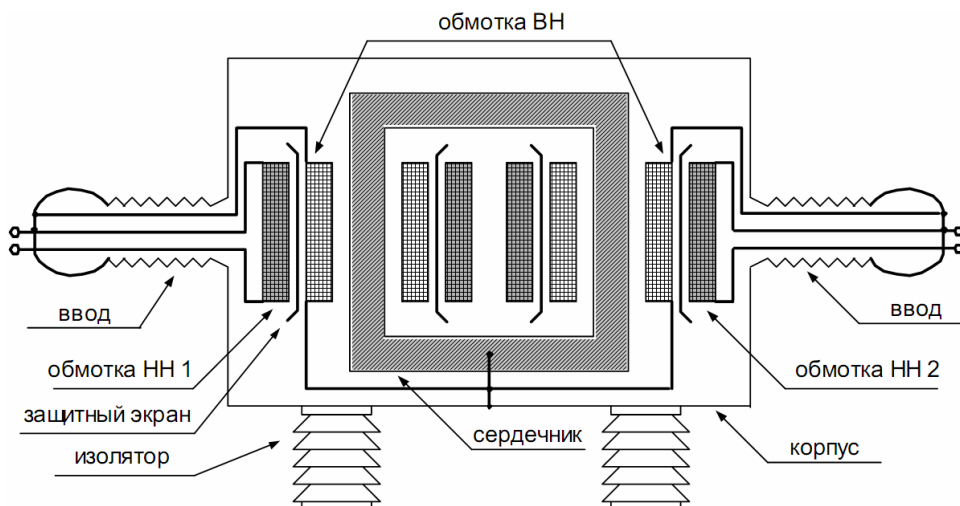


Рис. 13.1. Випробувальний трансформатор із двома входами

У зв'язку зі складністю виготовлення вводу на велику напругу, максимальна напруга, на яку виготовлений трансформатор з одним вводом, становить 1200 кВ, його загальна висота становить 15.5 м, з якої зовнішня частина вводу становить більше 9 м.

Конструкція випробувального трансформатора спрощується, якщо для виводу високої напруги з бака використовуються *два вводи*, кожен з яких розрахований на половину номінальної напруги (рис. 13.1). Обмотка низької напруги розташовується на одному стрижні осердя та ізолюється від нього на половину номінальної напруги. Обмотка високої напруги складається із двох частин, розташованих на обох стрижнях магнітопроводу. Середня точка обмотки *ВН* з'єднується з магнітопроводом і баком трансформатора. Один з кінців обмотки *ВН* заземлюється, і бак перебуває під половинною напругою трансформатора. Між обмотками *ВН* та *НН* розташовують незамкнутий провідний захисний екран, що перешкоджає передачі імпульсів напруги через міжобмоточну ємність при перекритті випробуваної ізоляції. Крім того, у трансформаторі звичайно є не зображена на рис. 13.1 обмотка зв'язку, що складається із двох паралельно з'єднаних між собою частин, розташованих на різних сторонах осердя. Ця обмотка поліпшує зв'язок напівобмоток трансформатора й знижує напруга короткого замикання.

Друга обмотка *НН* використовується при *з'єднанні трансформаторів у каскад* з послідовним живленням для одержання надвисоких випробувальних напруг. Обмотки *ВН* каскаду з'єднуються послідовно, а живлення кожного наступного трансформатора здійснюється через попередній (рис. 13.2). При цьому перший трансформатор виявляється більш завантаженим; для розвантаження іноді застосовують схеми з паралельним живленням підвищувальних трансформаторів через ізолюючі трансформатори.

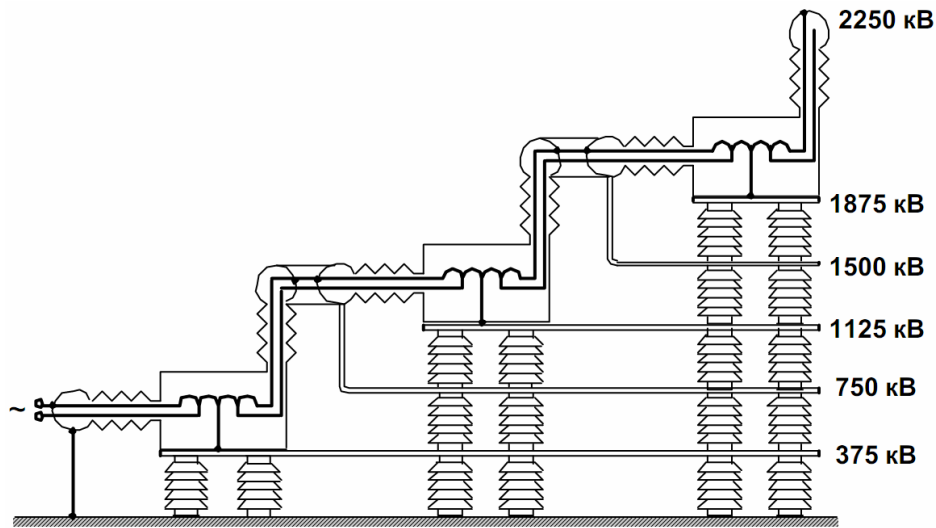


Рис. 13.2. Схема каскаду трансформаторів 3×750 кВ

Ізолятори схеми рис. 13.2 поєднані один з одним металевими рамами для вирівнювання розподілу напруги по стовпчиках ізоляторів. Проводи, що з'єднують трансформатори один з одним, поміщені в екрани, що мають той же потенціал, що й проводи, але з більшим радіусом, що перешкоджає виникненню корони.

Спрощена схема випробної установки змінної напруги показана на рис. 13.3. Схема містить випробувальний трансформатор $T2$ (або каскад трансформаторів), регулювальний трансформатор $T1$, захисний резистор $R1$, призначений для демпфірування коливань при пробію ізоляції та зниження виникаючих в обмотці трансформатора перенавантажень, і вимірювальні прилади. Вимірювання напруги на виході установки може вироблятися за первинною напругою випробувального трансформатора, як показано на рис. 13.3, а також вольтметр може приєднуватися на відвід високовольної обмотки. Інші можливості вимірювання напруги розглядаються далі.

Для регулювання напруги застосовуються регулювальні автотрансформатори, індукційні регулятори та двигун-генераторні установки. Максимальна потужність регулювальних автотрансформаторів звичайно не перевищує 50 – 100 кВа. При великих потужностях для плавного регулювання напруги можуть бути використані індукційні регулятори, що являють собою

трансформатори із взаємно переміщуваними обмотками, що не мають переміщуючих контактів і забезпечують плавне регулювання напруги. Двигун-генераторні установки застосовують для живлення трансформаторів напругою 500 кВ і вище та трансформаторних каскадів. Ці установки забезпечують плавне регулювання напруги, незалежність випробної напруги від коливань напруги мережі та синусоїдальну форму випробувальної напруги

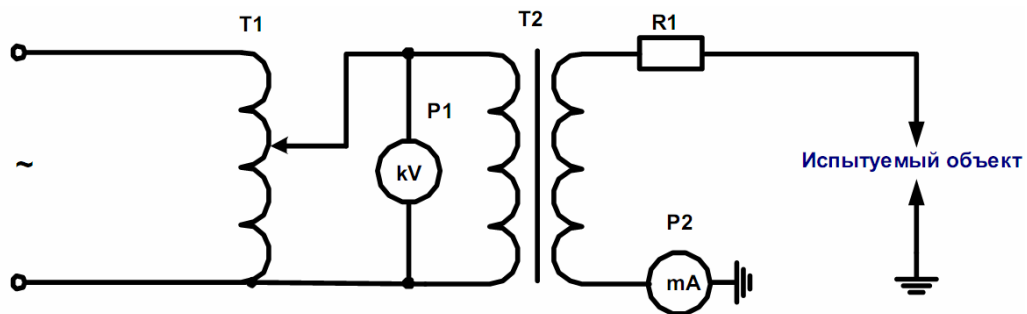


Рис. 13.3. Схема випробувальної установки змінної напруги

Відношення амплітудного значення випробувальної напруги до діючого повинне складати $\sqrt{2} \pm 0.07$, а частота випробувальної напруги не повинна відрізнятися від 50 Гц більш ніж на 10%.

13.2. Випробувальні установки високої постійної напруги

Для одержання високої постійної напруги використовують випрямні установки та електростатичні генератори. Останні дозволяють одержувати найбільш високі напруги – аж до 30 МВ – але при малих струмах, не більш 1 мА. Тому при випробуваннях ізоляції застосовують в основному випрямні установки.

Випрямні установки в принципі можуть бути поділені на дві групи: установки однополуперіодного випрямлення та установки, побудовані за схемами множення напруги.

В однополуперіодних випрямлячах висока змінна напруга перетворюється у високу постійну напругу за допомогою випрямляча і згладжуючого пристрою. Схема пристрою зображена на рис. 13.4.

У якості випрямних елементів застосовують послідовно ввімкнені напівпровідникові діоди. Основні труднощі становить висока зворотня напруга ($2U_m$ в однополуперіодних схемах), яка повинна бути рівномірно розподілена по окремих діодах. Рівномірності розподілу досягають або шунтуванням діодів резисторами або конденсаторами, або використанням діодів з лавинною зворотною характеристикою (аналоги стабілітронів).

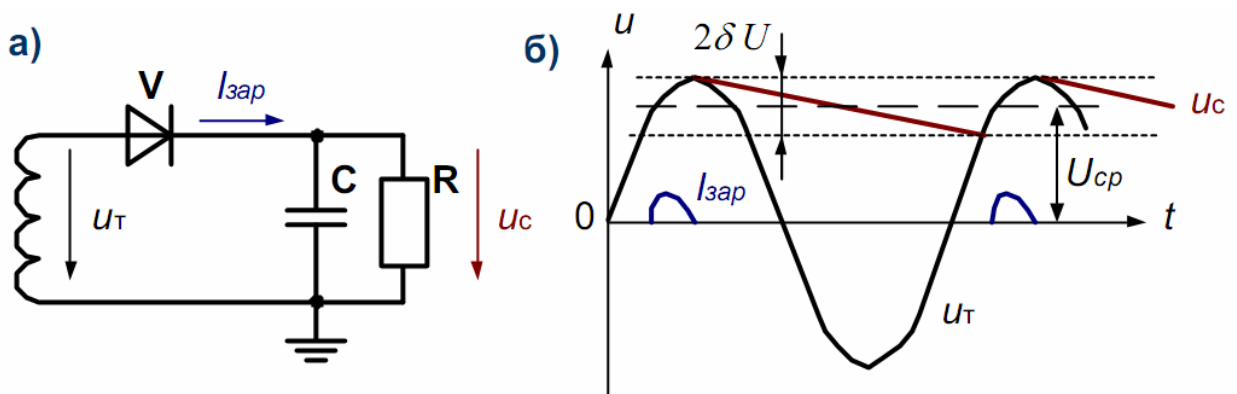


Рис. 13.4. Однополуперіодний випрямляч

Напруга на випробовуваній ізоляції при схемі рис. 13.4 пульсує поблизу середнього значення.

Схеми множення напруги дозволяють отримати високу постійну напругу від джерела з набагато меншою напругою в порівнянні з однополуперіодним випрямлячем. На рис. 13.5 показана схема з подвоєнням напруги, у якій $C1$ заряджається приблизно до амплітудного значення в ті півперіоди, у які вентиль $V1$ відкритий. У півперіоди протилежної полярності відкривається вентиль $V2$ і конденсатор $C2$ опиняється включеним на сумарну напругу обмотки трансформатора та зарядженого конденсатора $C1$. При відсутності навантаження конденсатор $C2$ заряджається до подвійної амплітуди напруги трансформатора. У цій схемі зворотня напруга на кожному з діодів дорівнює подвоєній амплітуді напруги трансформатора.

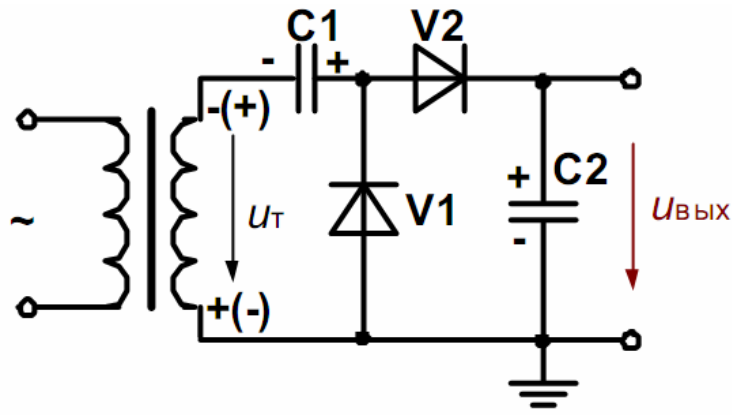


Рис. 13.5. Схема випрямляча з подвоєнням напруги

Максимальна напруга, яка отримана на випрямній установці, становить 1.5 МВ.

У якості характеристик постійної напруги, що містить пульсації, використовують наступні характеристики:

- полярність напруги;
- середнє значення напруги $U_{CP} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt$;
- коефіцієнт пульсацій $\delta U = 0.5(U_{\max} - U_{\min})$, який часто виражають у відсотках від середнього значення.

Згідно з рекомендаціями Міжнародної електротехнічної комісії, пульсації не повинні перевищувати 5% від середнього значення напруги.

Резюме

Випробувальні установки високої змінної напруги призначені для одержання високої регульованої змінної напруги, за допомогою якої випробовують ізоляцію. Основним вузлом установки є випробувальний трансформатор, що відрізняється малою потужністю, обмеженим часом включення, малим запасом електричної міцності ізоляції. Для одержання напруг вище 1000 кВ використовують каскадне з'єднання випробувальних

трансформаторів. Схема випробувальної установки містить випробувальний трансформатор або каскад, регулювальний трансформатор і захисний резистор.

Для одержання високої постійної напруги при випробуваннях ізоляції використовують випрямні установки. Випрямні установки діляться на дві групи: установки однополуперіодного випрямлення та установки, побудовані по схемах множення напруги. Основна проблема високовольтного випрямляча – вирівнювання зворотної напруги на послідовно включених вентилях.

Контрольні питання

1. Які типи трансформаторів Вам відомі? Чим відрізняється випробувальний трансформатор від інших трансформаторів?
2. Поясніть принцип роботи каскаду трансформаторів.
3. Поясніть призначення основних вузлів випробувальної установки високої змінної напруги.
4. Як побудована випрямна установка високої постійної напруги?

14. ГЕНЕРАТОРИ ІМПУЛЬСНИХ НАПРУГ

14.1. Генератори комутаційних імпульсів

При комутаціях високовольтних кіл виникають імпульси перенапруг, що мають час наростання до 1000 мікросекунд і тривалість до напівспаду порядку декількох мілісекунд. Для випробувань витривалості ізоляції до таких перенапруг використовуються генератори комутаційних імпульсів, побудовані по різноманітних схемах. Одна з найпростіших схем генератора комутаційних імпульсів показана на рис. 14.1.

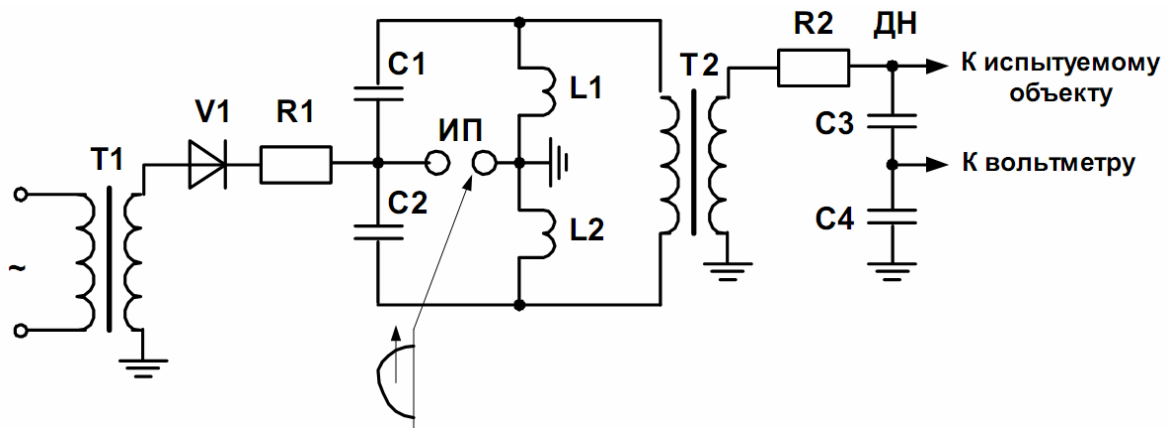


Рис. 14.1. Схема генератора комутаційних імпульсів

Конденсатори $C1$ та $C2$ цієї схеми заряджаються від високовольтного випрямляча $V1$. Запуск здійснюється шляхом подачі імпульсу напруги, що підпалює, на іскровий проміжок $ИП$. Після пробоя цього проміжку у двох окремих контурах $L1C1$ і $L2C2$ починаються загасаючі коливання. Частоти контурів обрані таким чином, щоб $f_2 = (3...5)f_1$. Імпульсний трансформатор $T2$ додатково збільшує напругу, причому на його вторинній обмотці створюється різниця напруг двох контурів (рис. 14.2). Тривалість фронту такого імпульсу трохи менше половини періоду другого контуру, тобто $\tau_\phi = \frac{0.4}{f_2}$.

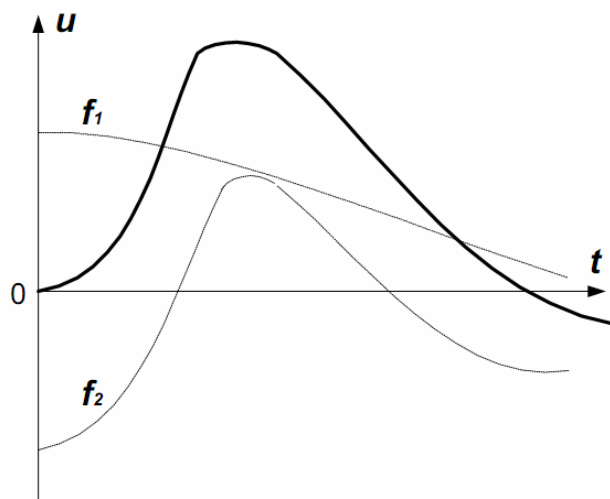


Рис. 14.2. Форма вихідного імпульсу генератора

Випробування комутаційними імпульсами здійснюються аналогічно випробуванням грозовими імпульсами. Стандартними комутаційними імпульсами за ДСТ 1516.2-97 є аперіодичний імпульс тривалістю 2.5 ± 0.5 мс із фронтом 250 ± 50 мкс і коливальний імпульс тривалістю 7.5 ± 2.5 мс із фронтом 4.0 ± 1.0 мс.

14.2. Генератори імпульсних напруг

Випробування ізоляції обладнання стандартними грозовими імпульсами, що мають тривалість фронту 1.2 мкс і тривалість до напівспаду 50 мкс, здійснюють за допомогою генераторів імпульсних напруг (ГІН). Схеми ГІН досить різноманітні, однак випробування ізоляції зазвичай здійснюють генераторами з ємнісними накопичувачами, що мають досить невеликі паразитні індуктивності елементів.

Стандартний грозовий імпульс у ємнісному ГІН *отримують* шляхом розряду високовольтного конденсатора на резистор, а порівняно пологий фронт у 1.2 мкс формують за рахунок зарядження допоміжного конденсатора через додатковий резистор. Таким чином, мінімальна кількість елементів ГІН без урахування зарядного пристрою та комутатора становить чотири (рис. 14.3); такі схеми застосовують при напругах менше 100 кВ.

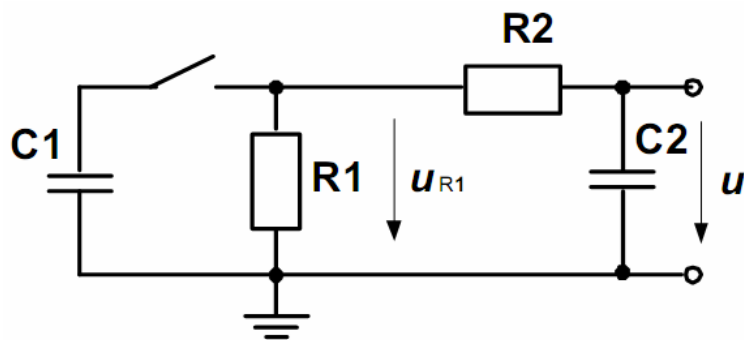


Рис. 14.3. Схема одноступінчастого ГН

Схема рис. 14.3 містить основний попередньо заряджений конденсатор $C1$, основний розрядний резистор $R1$ і елементи формування фронту $C2$ та $R2$. Для формування стандартного грозового імпульсу потрібно, щоб постійна часу розряду основного конденсатора $\tau_1 = C_1 R_1$ була набагато більше постійної часу заряджання конденсатора фронту $\tau_2 = C_2 R_2$. Тому можна вважати, що в початкові моменти часу початкова напруга на конденсаторі $C1$ різко зменшується через те, що **паралельно конденсатору $C1$ підключається конденсатор $C2$** , так що початкова напруга процесу розряду виявляється трохи менше, $U'_0 = \frac{q}{C_1 + C_2} = U_0 \frac{C_1}{C_1 + C_2}$; тут $q = C_1 U_0$ початковий заряд конденсатора $C1$. Приблизно можна вважати, що заряд конденсатора $C2$ відбувається від джерела постійної напруги величиною U'_0 :

$$u = U'_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right] = U_0 \frac{C_1}{C_1 + C_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right].$$

У цій формулі одиниця в дужках відповідає незмінній напрузі джерела постійної напруги; оскільки в схемі ГН напруга достатньо повільно в порівнянні із фронтом зменшується із часом через розряд конденсатора на резистор $R1$, те цю **оддиницю слід замінити експонентою $\exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right)$** , що відображає найпростіший процес розряду конденсатора на резистор:

$$u = U_0 \frac{C_1}{C_1 + C_2} \left[\exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right].$$

Таким чином, форма імпульсу ГІН відображається різницею двох експонент, з яких перша відображає спад імпульсу за рахунок розряду основного конденсатора ГІН на розрядний резистор, а друга – фронт імпульсу, утворений зарядом фронтового конденсатора.

Величина $\eta = \frac{C_1}{C_1 + C_2}$, що показує ступінь використання початкової напруги ГІН, називається **коефіцієнтом використання** ГІН.

Іноді з конструктивних міркувань фронтовий резистор R_2 включають перед основним резистором R_1 (рис. 14.4). У цьому випадку напруга на виході ГІН зменшується ще й за рахунок дії ділянки $R_1 R_2$, так що коефіцієнт використання виявляється менше на коефіцієнт розподілу цього ділянки,

$$\eta = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

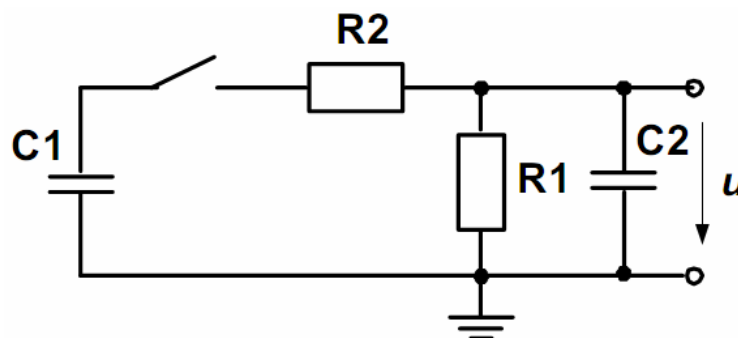


Рис. 14.4. Варіант схеми одноступінчастого ГІН

Схему ГІН по рис. 14.3 або 14.4 іноді називають одноступінчастою. Використання подібної схеми при напрузі більше 250 – 300 кВ стає неприйнятним через великі витрати на випрямляч і великих розмірів елементів. Одержання імпульсів високої напруги з використанням порівняно низьковольтних зарядних пристроїв і конденсаторів можливо при використанні **багатоступінчастих (каскадних) схем** ГІН. У багатоступінчастій схемі кілька

конденсаторів заряджаються від зарядного пристрою паралельно, а при розряді перемикаються в послідовне з'єднання з додаванням напруг на них. Перемикання звичайно здійснюється за допомогою іскрових проміжків.

На рис. 14.5 показана схема чотириступінчастого ГІН. ГІН має зарядний пристрій на трансформаторі $T1$ та елементах $R_{защ}$ і $V1$, основні конденсатори $C1$, кульові розрядники $FV1-FV5$, резистори R_D , що демпфірують та елементи формування фронту $R2C2$. Відстані між кулями проміжків $FV1-FV4$ підібрані так, що їх пробивна напруга трохи більше зарядної напруги. Символами C_{Π} позначені паразитні ємності обладнання, що виконують істотну роль у роботі генератора.

Конденсатори ГІН заряджаються від високовольтного випрямляча через зарядні резистори $R_{зар}$ паралельно до однакової напруги U_0 . На проміжок $FV1$ подається додатковий імпульс напруги, так що $FV1$ пробивається. Потенціал точки 3 практично зразу стає рівним U_0 , оскільки величина опору резистора R_D мала і мала постійна часу кола $R_D C_{\Pi}$. Потенціал точки 4 стосовно землі при цьому дорівнює сумі потенціалу точки 3 і напруги U_0 , а потенціал точки 5 залишається нульовим, оскільки паразитна ємність C_{Π} не встигає зарядитися через порівняно високоомний резистор $R_{зар}$. Напруга на проміжку $FV2$ виявляється рівною $2U_0$ і проміжок $FV2$ пробивається, що призводить у перший момент часу до появи напруги $3U_0$ на проміжку $FV3$. Аналогічно пробивається й проміжок $FV4$, так що всі чотири конденсатори виявляються з'єднаними послідовно через іскрові проміжки та резистори R_D . Резистор R_D використовують для демпфірування коливань у контурі $C1-FV1-C_{\Pi}$, у якому через наявність індуктивностей проводів можуть виникнути загасаючі коливання з великою амплітудою.

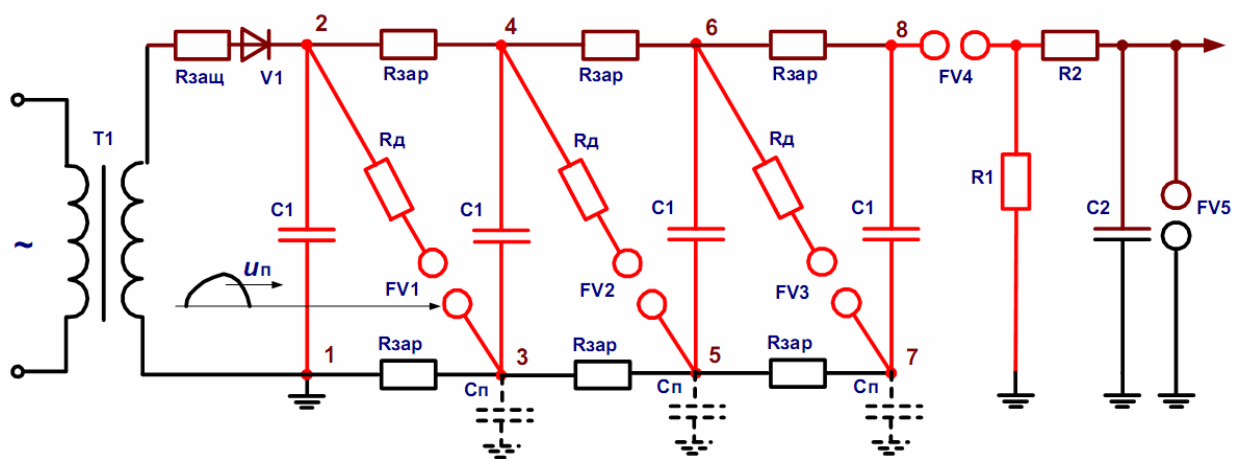


Рис. 14.5. Схема чотириступінчастого ГН

Напруга $4U_0$ (або nU_0 при n конденсаторах) називається сумарною **зарядною напругою** ГН; іншою важливою характеристикою ГН є найбільше значення енергії $\frac{nCU_{ном}^2}{2}$, що запасється генератором, При зміні зарядної напруги потрібна перенастроювання іскрових проміжків.

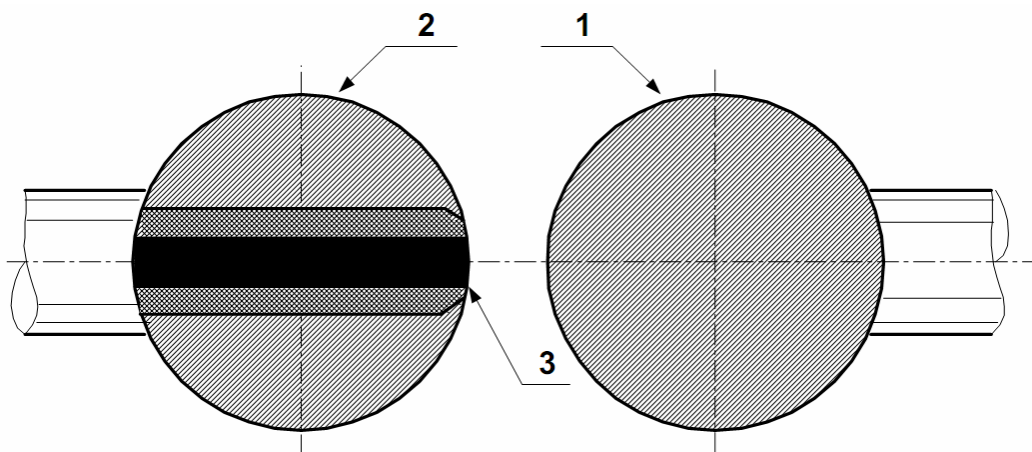


Рис. 14.6. Будова тригатрона

У якості пускового проміжку $FV1$ звичайно використовується трьохелектродний розрядник (тригатрон). На рис. 14.6 представлений переріз тригатрона; при подачі імпульсу напруги, що підпалює, між електродами 2 і 3 проміжок між ними пробивається, створюючи область іонізації в основному

розрядному проміжку, через що пробивається й основний проміжок між електродами 1 і 2.

Випробування ізоляції проводять як цілими, так і зрізаними імпульсами напруги. Іскровий проміжок $FV5$ по рис. 14.5 існує для одержання зрізаного імпульсу, для чого на нього через 2..5мкс після спрацьовування генератора подається імпульс поджигу, проміжок пробивається й зрізує імпульс ГІН.

Резюме

Для випробування ізоляції комутаційними імпульсами напруги використовують генератори комутаційних імпульсів, які можуть бути виконані на базі коливальних контурів з підвищувальними імпульсними трансформаторами.

Стандартні грозові імпульси одержують шляхом розряду зарядженого високовольтного конденсатора на резистор; фронт імпульсу формують шляхом зарядження додаткового конденсатора через додатковий фронтовий резистор. Для одержання імпульсів напругою більш 250 – 300 кВ використовують багатоступінчасті схеми ГІН, у якій кілька конденсаторів заряджаються від зарядного пристрою паралельно, а при розряді за допомогою іскрових проміжків перемикаються в послідовну з'єднанні з додаванням напруг на конденсаторах.

Контрольні питання

1. Приведіть спрощену схему генератора комутаційних імпульсів і поясніть принцип його дії.
2. Приведіть спрощену схему генератора стандартних грозових імпульсів, поясніть принцип його дії та форму одержуваних імпульсів.
3. Поясніть принцип роботи багатоступінчатого генератора імпульсів.

15. ВИМІРЮВАННЯ ВИСОКИХ НАПРУГ

15.1 Вимірювання високих постійних напруг

Для вимірювання високих постійних напруг використовується три основних методи: вимірювання за допомогою вимірювального кульового розрядника, вимірювання електростатичним вольтметром і вимірювання за допомогою додаткових резисторів.

Вимірювальний кульовий розрядник являє собою дві металевих кулі з добре обробленими поверхнями та з можливістю зміни відстані між кулями. Цей розрядник вважається дуже надійним приладом для вимірювання постійної напруги, а також для вимірювання амплітуди змінної та імпульсної напруг. Розкид розрядних напруг кульового розрядника не перевищує $\pm 3\%$, і при дотриманні умов вимірювання напруги така ж і похибка вимірювання напруги.

Можливість вимірювання заснована на законі Пашена, що зв'язує пробивну напругу проміжку із відстанню між поверхнями куль. Залежності пробивних напруг від відстані для куль різних діаметрів наведені в спеціальних таблицях, отриманих шляхом ретельної обробки численних експериментальних даних. Таблиці складені для тиску повітря 760 мм рт. ст. та температури 20°C. При інших атмосферних умовах потрібно корегування табличного значення пробивної напруги на відносну густину повітря.

Для захисту поверхні куль від оплавлення при пробії послідовно з розрядником устанолюється резистор з опором, що обирається зі співвідношення 1...10 Ом/В.

Якщо за кульовим розрядником градується інший вимірювальний прилад (електростатичний кіловольтметр або система з додатковим резистором), то відстань між кулями виставляється на напругу, на яку розраховується градувальний пристрій і напруга повільно підвищується до пробою кульового розрядника.

Якщо проводяться вимірювання самим розрядником, то кулі повільно зближаються до пробою. За таблицею для даного діаметра куль із відстані визначають розрядну напругу, що множать на поправочний коефіцієнт, що дорівнює відносній густині повітря $\delta = \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T}$, якщо остання відрізняється від одиниці не більше ніж на 10% (тобто шукана пробивна напруга дорівнює табличному значенню, помноженому на відносну густину повітря).

Електростатичний вольтметр являє собою конденсатор, одна із пластин якого рухома та закріплена на пружині. Сила взаємодії пластин визначається відповідно до закону Кулона добутком їхніх зарядів, тобто $F = kq^2$, де q – заряд однієї із пластин, k – коефіцієнт пропорційності, що залежить від відстані між електродами. Оскільки $q = CU$, де C – ємність конденсатора, U – напруга між пластинами, $F = kC^2U^2 = k_1U^2$, таким чином відхилення рухомої пластини, пропорційне діючій силі, залежить від квадрата вимірюваної напруги. Шкала такого кіловольтметра квадратична.

Із високовольтних електростатичних кіловольтметрів розповсюджений настільний прилад С-100, що має три межі вимірювання 25, 50, 75 кВ із вхідною ємністю в межах 5...50 пФ і опором витoku порядку 10^{15} Ом. Кіловольтметр С-96 дозволяє вимірювати напруги до 30 кВ, а кіловольтметр С-101, що представляє собою підлогову конструкцію досить великих розмірів, – до 300 кВ.

Вимірювання високої постійної напруги найпростіше здійснювати за допомогою **магнітоелектричного вимірювального механізму**, включеного послідовно з високовольтним **додатковим резистором** з великим опором (рис. 15.1). Магнітоелектричний механізм має найвищу чутливість серед електромеханічних вимірювальних механізмів, що дозволяє обмежитися дуже невеликими струмами у вимірювальному колі.

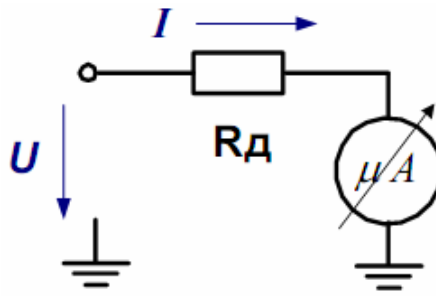


Рис. 15.1. Схема вимірювання високої напруги магнітоелектричним приладом з додатковим резистором

Додатковий резистор R_d розрахований на повну вимірювану напругу та звичайно виконується у вигляді ланцюжка послідовно з'єднаних резисторів з вуглецевим або металевим напівпровідним шаром. Опір додаткового резистора вибирається не менше ніж 1 МОм/кВ (струм менше 1 мА), щоб забезпечити невелике тепловиділення. Через виникнення струмів витоку по поверхнях резисторів обмежують опір зверху, не більше 10 МОм/кВ (струм 0.1 мА).

При напругах вище 100 кВ ланцюжок резисторів розташовують по спіралі та поміщають в ізоляційний циліндр із маслом або елегазом. Масляна ізоляція поліпшує тепловідвід, а масло або елегаз дозволяють збільшити допустимі напруги на кожному резисторі ланцюжка. Величина вимірюваної напруги визначається струмом, що протікає, і опором резисторів, $U = R_d I$.

15.2. Вимірювання високих змінних напруг

Вимірювальний кульовий розрядник є універсальним вимірювальним приладом, придатним і для виміру амплітуди змінної напруги. Методика вимірювань залишається такою ж, як і для випадку вимірювання високої постійної напруги.

Електростатичний вольтметр принципово придатний для вимірювання ефективного значення змінної напруги. Сила взаємодії пластин електростатичного вольтметра $F = kq^2$ в цьому випадку періодично змінюється

в часі, а відхилення рухомої пластини через її інерційність визначається середнім за період значенням сили, $\overline{F} = kC^2\overline{u}^2 = kC^2 \frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt = k_1 U^2$, тобто середньоквадратичним значенням миттєвої напруги, що за визначенням є ефективним значенням напруги.

Частотний діапазон електростатичного кіловольтметра обмежений тільки паразитними індуктивностями; так, для кіловольтметра С-100 верхня гранична частота становить 10 МГц.

Ємнісні дільники напруги дозволяють вимірювати високі змінні напруги за допомогою низьковольтних вольтметрів, забезпечуючи точне повторення форми високої напруги на низьковольтному виході. Остання вимога важлива у випадку контролю гармонійного складу змінної напруги.

Омічні дільники на основі резисторів на змінній напрузі не придатні через наявність паразитних ємностей, що вимагає застосування резисторів з порівняно невеликим опором і великою розсіюваною потужністю; індуктивні дільники мають нелінійність параметрів, паразитні ємності та омічні властивості.

Ємнісний дільник має високовольтне плече C_1 (рис. 15.2) і низьковольтне плече C_2 . Ємність високовольтного плеча значно менше ємності низьковольтного плеча, і практично вся висока напруга припадає на високовольтне плече, що часто виконують послідовним з'єднанням декількох конденсаторів. Вхідна та вихідна напруги дільника пов'язані одна з одною коефіцієнтом ділення дільника $K = \frac{U_{вх}}{U_{вих}} = \frac{C_1 + C_2}{C_1}$.

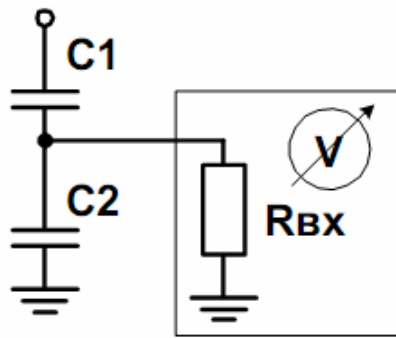


Рис. 15.2. Схема ємнісного дільника

Дільник напруги повинен задовольняти трьом основним вимогам:

- виконання ізоляції дільника таким чином, щоб були відсутні часткові розряди, що спотворюють форму кривої вимірюваної напруги;
- точний збіг форм кривих вхідної та вихідної напруг (на низькій напрузі);
- мале завантаження вимірюваних кіл.

Перша вимога призводить до того, що висота дільника напруги (не тільки ємнісного, але й омичного) становить зазвичай 2.5 м/МВ для постійних напруг і грозових імпульсів і близько 5 м/МВ (ефективне значення) для змінної напруги.

Перекручування форми вихідної напруги (або залежність коефіцієнта ділення від частоти) виникає через обмеження частотного діапазону роботи конденсаторів дільника, через вплив паразитних індуктивностей схеми та через підключення вхідного опору вольтметра. Для зниження впливу останнього фактору необхідно дотримуватися умови $R_{\text{вх}} \gg \frac{1}{\omega C_2}$ на нижній межі

частотного діапазону роботи дільника.

Мале завантаження вимірюваних кіл створюється при малій ємності високовольтного плеча дільника, однак при занадто малих ємностях стає помітним вплив навколишніх предметів на коефіцієнт ділення. Практично при досить великій висоті дільника питома ємність високовольтного плеча повинна бути не менше 30-50 пФ/м.

Для вимірювання амплітудного значення змінної напруги може бути використана проста схема рис. 15.3. Мікроамперметр РА магнітоелектричного

типу реагує на середнє за період значення струму, що протікає через нього протягом позитивного напівперіоду:

$$I_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i dt = \frac{C}{T} \int_{-U_m}^{+U_m} du = \frac{2CU_m}{T} = 2fCU_m,$$

так що амплітуда напруги дорівнює $U_m = \frac{1}{2fC} I_{cp}$. Другий вентиль VD2 забезпечує протікання струму в негативний напівперіод, що запобігає нагромадженню заряду на конденсаторі.

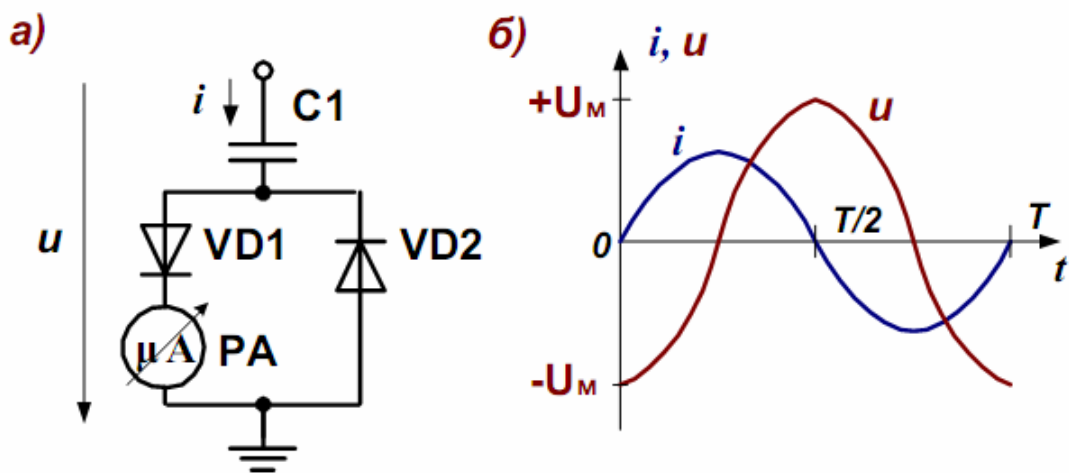


Рис. 15.3. Схема вимірювання амплітудного значення та криві струму й напруги

Ця схема придатна тільки у випадку, якщо протягом кожного напівперіоду напруги є не більше одного максимуму.

В умовах експлуатації найпоширенішим методом вимірювання напруги є застосування **низьковольтних вольтметрів із трансформаторами напруги**. При дотриманні умов завантаження трансформаторів напруги цей метод забезпечує високу точність вимірів, однак несинусоїдність напруги призводить до досить великих похибок. Деякі типи трансформаторів напруги вносять великі перекручування вже в третю гармоніку (наприклад, трансформатор ЗНОМ-35), хоча є повідомлення про нормальне перетворення частот трансформаторами напруги аж до 1 кГц.

В іспитових установках змінної напруги вимірювання високої напруги провадяться шляхом **виміру напруги первинної обмотки іспитового трансформатора** з перерахуванням за коефіцієнтом трансформації. Цей метод вимірювання може призводити до великих похибок у зв'язку з наявністю індуктивності розсіювання трансформатора.

Оскільки об'єкт випробувань являє собою ємнісне навантаження з високою добротністю, то разом з індуктивністю розсіювання утвориться послідовний коливальний контур (рис. 15.4). При досить великій ємності випробуваного об'єкта напруга на ньому може бути істотно вище розрахованого за коефіцієнтом трансформації. Трохи менші похибки виникають при підключенні низьковольтного вольтметра до відводу високовольтної обмотки, однак для виключення резонансних ефектів рекомендується вимірювати безпосередньо високу напругу.

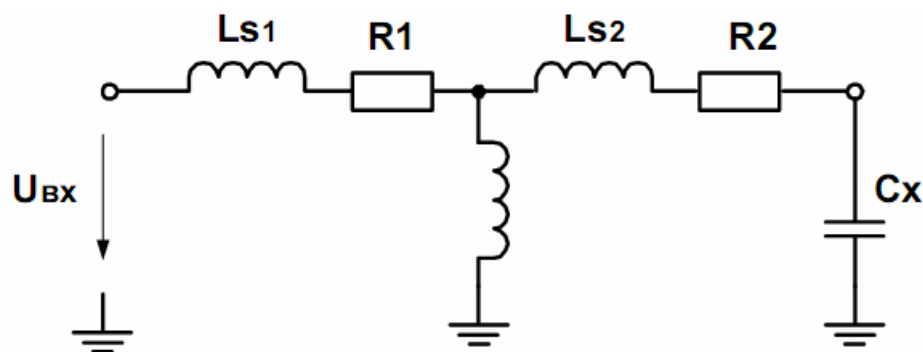


Рис. 15.4. Т-подібна схема заміщення трансформатора з ємнісним навантаженням

15.3. Вимірювання високих імпульсних напруг

Вимірювальний кульовий розрядник придатний і для вимірювання максимального значення напруги стандартного грозового імпульсу. При вимірюванні амплітуди імпульсу підбирають таку відстань між кулями розрядника, при якій з десяти поданих імпульсів п'ять закінчуються пробоем, а інші п'ять – ні. Пробивна напруга, що визначається за такою відстанню з урахуванням виправлення на відносну густину повітря (п'ятдесятивідсоткова

пробивна напруга), відповідає амплітуді імпульсу з похибкою в $\pm 3\%$. Розряд між кулями в цьому випадку відбувається поблизу максимального значення напруги імпульсу. Опір резистора, включеного послідовно з розрядником, не повинен перевищувати 500 Ом, тому що при більших його значеннях виникають неприпустимі похибки вимірювання через спадання напруги за рахунок ємнісного струму розрядника до його пробою.

При проведенні вимірювань відстань між кулями змінюється шаблями, що становлять 2...5% від очікуваної пробивної відстані. На кожному щаблі до об'єкта прикладається не менше 10 імпульсів з інтервалами не менше 5 с. П'ятдесятивідсоткова напруга визначається шляхом інтерполяції результатів, отриманих на двох або більше відстанях. З меншою точністю можна допустити підбір відстані, при якій відбувається від чотирьох до шести пробойів розрядника з десяти однакових прикладених імпульсів.

Іншим способом вимірювання імпульсних напруг є застосування **дільників напруги з низьковольтним імпульсним вольтметром або осцилографом**. Дільник напруги може бути омічним, ємнісним або ємкісно-омічним. Основною характеристикою дільника є коефіцієнт ділення

$$K = \frac{u_{ex}}{u_{вх}} = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2}, \text{ де } Z_1 \text{ та } Z_2 - \text{повні опори високовольтного та}$$

низьковольтного плечей дільника. Іншою важливою характеристикою дільника є частотна характеристика, що представляє собою залежність коефіцієнта ділення від частоти.

Омічні дільники напруги виготовляють із ніхромового або константанового дроту, що намотується для зниження індуктивності біфілярно (тобто двома зустрічними паралельно ввімкненими котушками) на ізоляційний каркас. Застосування рідинних або об'ємних вугільних резисторів обмежене у зв'язку із залежністю їхніх опорів від температури та прикладеної напруги. З метою підвищення початкової напруги корони та поліпшення охолодження резистори поміщають в ізоляційні циліндри з маслом.

Паразитні індуктивності дільника та паразитні ємності елементів дільника стосовно заземлених частин призводять до перекручування форми вихідного імпульсу стосовно вхідної напруги, і найбільші перекручування мають місце на фронті імпульсу (збільшення тривалості фронту). Зі збільшенням опору дільника перекручування зростають, однак сильно знижувати опір дільника не можна через вплив дільника на параметри імпульсу. Типовими значеннями опору дільника є 10...20 кОм. Перекручування можна зменшити також за допомогою екранування омичних дільників. Найбільш ефективним є застосування кільцевого екрана, що насувається на високовольтний кінець дільника.

Для зниження впливу паразитних ємностей і вхідних ємностей низьковольтного обладнання (яке звичайно підключається за допомогою екранованого кабелю) застосовують **ємнісно-омичний дільник** напруги (рис. 15.5). Щоб коефіцієнт ділення не залежав від частоти, потрібне виконання умови $R_1 C_1 = R_2 C_2$, що може бути порушено впливом вимірювальних кіл низьковольтного плеча.

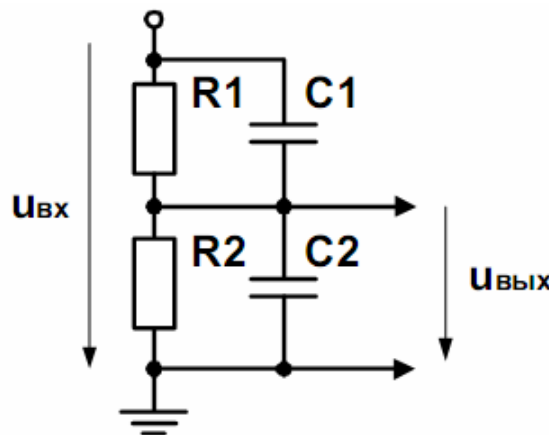


Рис. 15.5. Ємнісно-омичний дільник напруги

Ємнісний дільник напруги практично не призводить до перекручування вимірюваного імпульсу напруги (рис. 15.6). Щоб уникнути поширення відбитих хвиль у кабелі, що з'єднує дільник з осцилографом, послідовно з жилою біля

виходу дільника включається резистор R_c , опір якого дорівнює хвильовому опору кабелю.

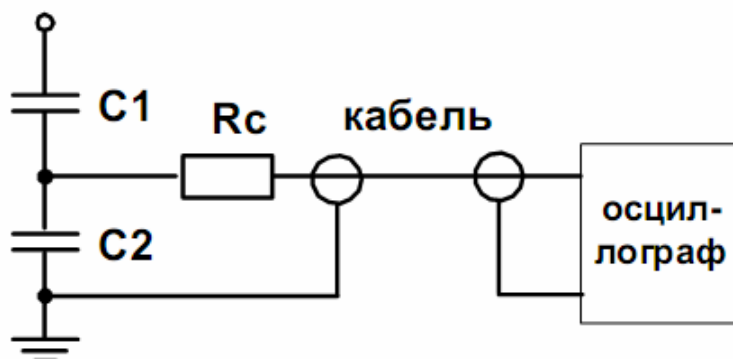


Рис. 15.6. Ємнісний дільник напруги

Схема рис. 15.6 забезпечує узгодження дільника з кабелем, якщо ємність кабелю значно менше ємності низьковольтного плеча дільника C_2 ; у протилежному випадку потрібні більш складні схеми узгодження.

Резюме

Найпоширенішими засобами вимірювання високих постійних напруг є кульові розрядники, електростатичні вольтметри та додаткові резистори.

На високій змінній напрузі для вимірювань застосовуються кульові розрядники, електростатичні вольтметри, ємнісні дільники напруг, трансформатори напруги із низьковольтними вольтметрами та низьковольтні вольтметри в первинних обмотках підвищувальних трансформаторів.

Для вимірювання імпульсних напруг використовують кульові розрядники та дільники напруги.

Контрольні питання

1. Які засоби використовують для вимірювання високих постійних напруг?

2. Які засоби використовують для вимірювання високих змінних напруг?
3. Які засоби використовують для вимірювання високих імпульсних напруг?
4. На чому заснований принцип дії вимірювального кульового розрядника?
5. Чи можна використовувати трансформатори напруги для контролю вищих гармонік змінної напруги?

