

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича

ТЕХНІКА ВИСОКИХ НАПРУГ
Навчальний посібник

ЧЕРНІВЦІ
Чернівецький національний
університет
2012

УДК 621.316.93(075.8)

ББК 31.247я73

Т 381

Друкується за ухвалою редакційно-видавничої ради
Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича

Рецензенти: Нічий Сергій Васильович, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики напівпровідників та наноструктур ЧНУ

Шпатар Петро Михайлович, кандидат технічних наук, доцент кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки ЧНУ

Т 381 Техніка високих напруг: Навчальний посібник / укл. :
Е. В. Майструк, Д. П. Козярьський. – Чернівці : Чернівецький
нац. ун-т, 2012. – 128 с.

У посібнику викладено основи знань про електричні розряди в газоподібних, рідких, твердих та комбінованих діелектриках, розглянуто конструкції зовнішньої ізоляції ліній електропередач і підстанцій, ізоляції обладнання високої напруги, високовольтних випробовувальних установок, також розглянуто випробовування та вимірювання, внутрішніх та грозових перенапруг в електричних системах, засоби захисту від них.

Для студентів фізичних факультетів вищих навчальних закладів енергетичного напрямку підготовки.

УДК 621.316.93(075.8)

ББК 31.247я73

© ЧНУ, 2012

Вступ

Техніка високих напруг виникла у зв'язку з необхідністю передавання великих електричних потужностей на далекі відстані. У 1880 році професор Петербурзького лісового інституту Д. А. Лачинов розробив і виклав теорію передавання електроенергії на великі відстані – підвищення напруги та зменшення струму зі збільшенням відстані й потужності, що передається.

Згідно з вимогами електроенергетики й розвивалась техніка високих напруг. Знадобилось створення промислових високовольтних установок змінної, постійної та імпульсної напруг, а також установок для проведення досліджень і випробовувань ізоляції при дії різноманітних видів високої напруги. Підвищення рівня напруг вимагало вивчення фізичних явищ, механізмів дії електромагнітних полів високої напруги на ізоляцію в різноманітних умовах експлуатації.

У наш час номінальна напруга ліній електропередач (ЛЕП) сягає 1150 кВ, а потужність, яка передається по одному ланцюгу, складає 6 Гігаватт. Надзвичайно велике значення при цьому мають питання створення й експлуатації комплексу обладнання, необхідного для генерації, передачі, перетворення та розподілу електричної енергії: генераторів, трансформаторів, повітряних і кабельних ліній, конденсаторів та інших пристроїв.

Курс складається з чотирьох розділів:

1. Розряди в діелектриках.
2. Високовольтна ізоляція.
3. Високовольтне обладнання та вимірювання.
4. Перенеапруги і захист від них.

Оскільки основною причиною виходу з ладу високовольтного обладнання є відмова ізоляції, то основні зусилля спрямовані на збереження ізоляції. Особливу роль відіграє знання закономірностей зародження й розвитку розрядів у діелектриках (в ізоляції). У високовольтному обладнанні використовують газоподібні рідинні, тверді ізоляційні матеріали, їх комбінації. Ізоляція поділяється на зовнішню (повітря і все, що знаходиться в повітрі) і внутрішню (ця ізоляція відділена від зовнішнього середовища корпусом і може бути газоподібною, рідкою, твердою, комбінованою).

РОЗДІЛ І. РОЗРЯДИ В ГАЗАХ

Повітря дотепер залишається основним видом зовнішньої ізоляції ліній електропередачі, енергетичного устаткування й високовольтної техніки. Традиційний шлях створення ізоляційних конструкцій, що включає їх повномасштабне натурне випробовування ще на пошуковому етапі роботи, зі збільшенням номінальних напруг стає все менш перспективним. Техніка випробовувань стає трудомісткою й вимагає більше часових і матеріальних витрат. У зв'язку із цим виникає потреба в числових оцінках електричної міцності повітряних проміжків на основі розрахункових моделей, що вірогідно відображають закономірності розвитку розряду в повітрі.

1.1. Конфігурація електричних полів

Діелектрики служать для ізоляції струмопровідних електродів різної полярності. Електроди, що ізолюються (шини розподільних пристроїв, проводи ліній електропередач, зовнішні струмопровідні частини електричних апаратів і т.п.), створюють електричні поля різної конфігурації.

Від форми електричного поля залежить електрична міцність і пробивна напруга. Форми електричних полів поділяються на однорідні, слабонеоднорідні й різконеоднорідні. Типовими прикладами однорідного поля є поле між двома плоскопаралельними електродами й електродами Роговського, слабонеоднорідне поле реалізується в системі електродів куля – куля (рис. 1.1) при відстані між електродами S менше діаметра кулі D ($S < D$), різконеоднорідне поле – при електродах стрижень – площина або стрижень – стрижень. Ступінь неоднорідності електричного поля між електродами характеризується коефіцієнтом неоднорідності K_H , що дорівнює відношенню максимальної напруженості електричного поля $E_{\text{макс}}$ до середньої напруженості $E_{\text{ср}}$ між електродами:

$$K_H = \frac{E_{\text{макс}}}{E_{\text{ср}}}. \quad (1.1)$$

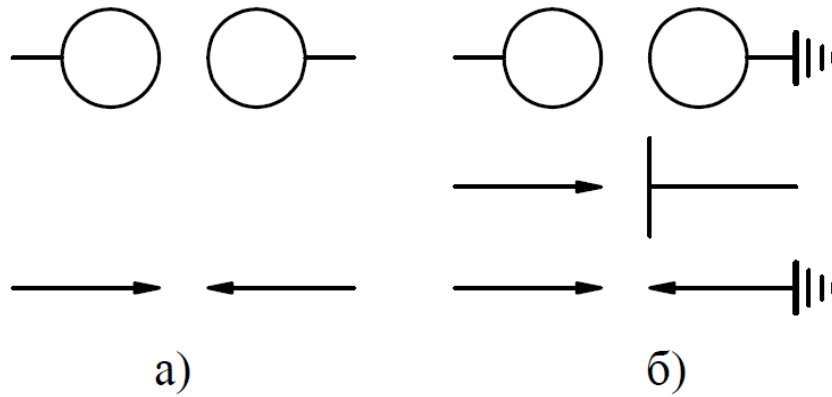


Рис. 1.1. Форми електричних полів: а – симетрична система електродів; б – несиметрична система електродів

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

$$E_{\text{ср}} = \frac{U}{S}. \quad (1.2)$$

Максимальна напруженість залежить від прикладеної до електродів напруги, конфігурації та розмірів електродів і відстані між ними. Наприклад, для коаксіальних циліндрів (кабель) (рис. 1.2) максимальна напруженість визначається як

$$E_{\text{макс}} = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r}}, \quad (1.3)$$

а середня напруженість

$$E_{\text{ср}} = \frac{U}{R - r}, \quad (1.4)$$

де U – прикладена напруга, кВ; r – зовнішній радіус внутрішнього циліндра (жила кабелю), см; R – внутрішній радіус зовнішнього циліндра (обплетення кабелю), см.

Підставивши (1.3) і (1.4) в (1.1), одержимо:

$$K_{\text{Н}} = \frac{R - r}{r \ln \frac{R}{r}}, \quad (1.5)$$

тобто $K_{\text{Н}}$ залежить від геометричних розмірів електродів.

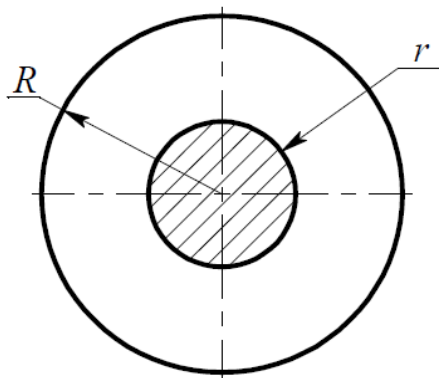


Рис. 1.2. Схема коаксіальних електродів

відсутнє заземлення якого-небудь із них (рис. 1.1, а). Несиметрична форма – електроди мають різну конфігурацію, розміри або один із них заземлений (рис. 1.1, б). Пробивні напруги в несиметричній системі електродів нижчі, ніж у симетричній.

Для однорідного поля коефіцієнт неоднорідності $K_H = 1$, для слабонеоднорідного – $K_H \leq 3$, для різконеоднорідного – $K_H > 3$.

Крім цього розрізняють симетричну і несиметричну системи електродів. Симетрична форма – електроди мають однакову форму й розміри та

1.2. Іонізаційні процеси в газі

При відсутності зовнішнього електричного поля частинки газу перебувають у стані хаотичного (теплого) руху, постійно зіштовхуючись із іншими частинками. Якщо на одиниці довжини шляху частинка виконала Z зіткнень, то середня довжина її вільного пробігу λ дорівнює:

$$\lambda = \frac{1}{Z}. \quad (1.6)$$

Значення λ залежить від концентрації частинок, а отже, і від тиску та температури газу. Зі збільшенням тиску й зменшенням температури λ зменшується. Частинки газу при тепловому русі переміщуються хаотично. Наявність зовнішнього електричного поля приводить до виникнення напрямленого руху заряджених частинок, якщо такі є, тобто до появи в газі електричного струму. Рухливість частинки в електричному полі залежить від її маси: чим більше маса частинки, тим менше її рухливість.

Розглядаючи процеси виникнення й зникнення заряджених частинок у газі, можна вважати електрони частинками й не враховувати їхні хвильові властивості. Коли електрони перебувають на найменших стаціонарних орбітах, то потенційна

енергія атома мінімальна. Такий стан атома стійкий і називається нормальним. Перехід одного або кількох електронів із нормальних орбіт на 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 $\sim 10^{-10}$ с. Повернення атома в нормальний стан відбувається мимовільно 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, поглинена атомом, називається енергією іонізації. Енергія збудження та іонізації виражається в електронвольтах (eV). Мінімальні енергії збудження та іонізації деяких газів, що містяться в повітрі, наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Енергії збудження та іонізації газів

Газ	Мінімальна енергія, eV	
	збудження	іонізації
N ₂	6,1	15,5
N	6,3	14,5
O	7,9	12,5
O ₂	9,1	13,6
H ₂ O	7,6	12,7

Одночасно з 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 й рекомбінує певна кількість заряджених частинок. Цей рівноважний стан характеризується певним ступенем іонізації газу, тобто відношенням концентрації іонізованих частинок до загальної концентрації частинок:

$$K_{\text{іон}} = \frac{n_{\text{іон}}}{N_{\Sigma}} \quad (1.7)$$

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

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

При зіткненні електронів із нейтральним атомом або молекулою можливе захоплення ними електрона й утворення негативного іона. Газу, в яких можливе утворення негативних іонів, називаються електронегативними (кисень, хлор, пари води та ін.), а газу, в яких негативні іони не утворюються – електропозитивними (азот, гелій).

1.3. Види іонізації

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

Є чотири види об'ємної іонізації:

- 1) ударна іонізація;
- 2) східчаста іонізація;
- 3) фотоіонізація;
- 4) термоіонізація.

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 напрямлену швидкість

$$V = kE, \quad (1.8)$$

де V – швидкість, $\text{см}/\text{с}$; k – коефіцієнт пропорційності, що одержав назву "рухливість" – швидкість дрейфу зарядженої частинки в електричному полі з $E = 1 \text{ В}/\text{см}$, $[\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ – розмірність рухливості k]:

$k_{el} \approx 400 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ – рухливість електронів;

$k_{iон} \approx 2 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ – рухливість іонів;

E – напруженість зовнішнього електричного поля, В/см.

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

$$\frac{mV^2}{2} \geq W_i, \quad (1.9)$$

де m – ефективна маса зарядженої частинки, кг ($m_{ел} = 9,1 \times 10^{-31}$ кг – ефективна маса електрона; $m_{прот} = 1,7 \times 10^{-27}$ кг – ефективна маса протона); V – швидкість руху зарядженої частинки, м/с; W_i – енергія іонізації нейтрального атома або молекули, еВ.

Оскільки швидкість електронів значно більша за швидкість іонів, то ударна іонізація іонами малоєфективна і визначальною є ударна іонізація електронами.

На рис. 1.3, а наведено схему ударної іонізації електроном.

Умовою ударної іонізації електроном є

$$\frac{mV^2}{2} \geq W_i \quad (1.10)$$

де m – маса електрона; V – швидкість електрона; W_i – енергія іонізації молекули (атома).

Східчаста іонізація відбувається тоді, коли енергія першого електрона, що впливає на нейтральний атом або молекулу, приводить 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. 1.3, б, наведена схема східчастої іонізації. Умовою східчастої іонізації є

$$\frac{m_1V_1^2}{2} + \frac{m_1V_3^2}{2} \geq W_i \quad (1.11)$$

де m_1 – 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 за енергію іонізації при поглинанні фотона нейтральним атомом або молекулою. Цей процес успішно здійснюється в суміші газів (повітря). При фотоіонізації можлива й східчаста іонізація. На (рис. 1.3, в) наведено схему фотоіонізації. Умовою фотоіонізації є

$$h\nu \geq W_i, \quad (1.12)$$

де h – постійна Планка; ν – власна частота фотона.

Термоіонізація зумовлена тепловим станом газу й може відбуватися в результаті наступних актів:

- 1) звільнення електрона при зіткненнях між атомами й молекулами при високих температурах;
- 2) фотоіонізація нейтральних атомів і молекул, збуджених у результаті теплової взаємодії при високих температурах;
- 3) іонізація 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 менша, ніж енергія іонізації. У табл. 1.2 наведені енергії дисоціації та іонізації для деяких газів.

Таблиця 1.2

Енергії дисоціації та іонізації

Молекула	Енергія дисоціації, еВ	Атом	Енергія іонізації, еВ
O ₂	5,17	O	13,6
N ₂	9,77	N	14,5

Поверхнева іонізація (емісія електронів) здійснюється за рахунок:

- 1) бомбардування поверхні катода позитивними іонами – вторинна електронна емісія (схема наведена на рис. 1.4, а); умова для виходу електрона з поверхні

$$\frac{m_{\text{іон}} V_{\text{іон}}^2}{2} \geq W_{\text{вих}} \quad (1.13)$$

де $m_{\text{іон}}$ – маса іона; $V_{\text{іон}}$ – швидкість іона; $W_{\text{вих}}$ – енергія виходу електрона.

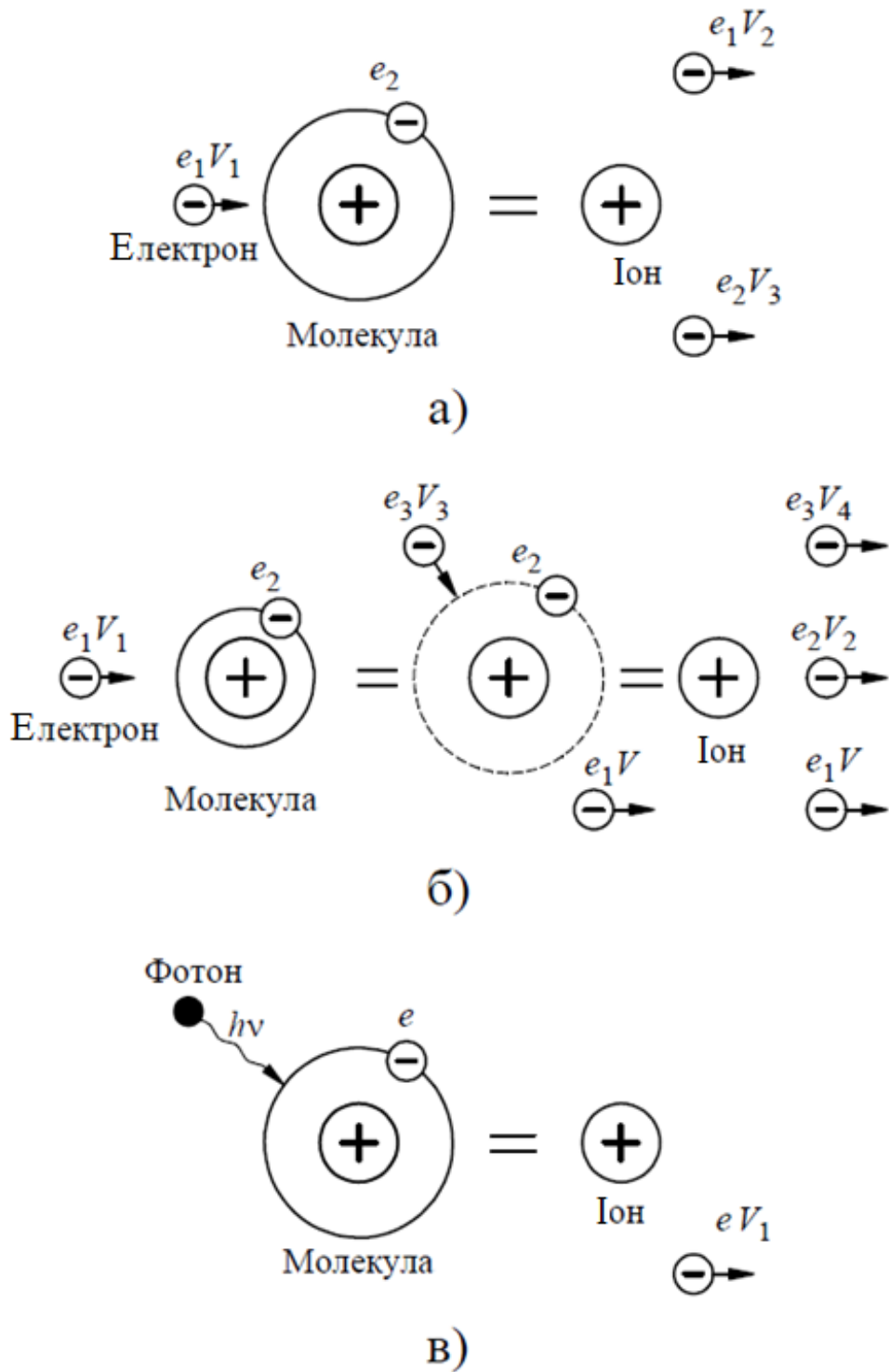


Рис. 1.3. Схеми об'ємної іонізації газу: а) ударна іонізація, б) східчаста іонізація, в) фотоіонізація; e – елементарний заряд електрона ($e=1,6 \times 10^{-19}$ Кл); t – маса зарядженої частинки
 2) енергії випромінювання, що опромінює катод, – ультрафіолетове світло, рентген, випромінювання збуджених

атомів і молекул в об'ємі газу між електродами – фотоemisія (схема наведена на рис. 1.4, б); при цьому умова для виходу електрона з поверхні

$$h\nu \geq W_{\text{вих}}, \quad (1.14)$$

де: h – постійна Планка; ν – частота випромінювання фотона; $W_{\text{вих}}$ – енергія виходу електрона.

3) нагрівання поверхні катода – термоелектронна emisія (схема наведена на рис. 1.4, в);

4) енергії зовнішнього електричного поля – автоелектронна або холодна emisія (схема наведена на рис. 1.4, г) можлива при напруженості електричного поля більше $3 \cdot 10^2$ кВ/см.

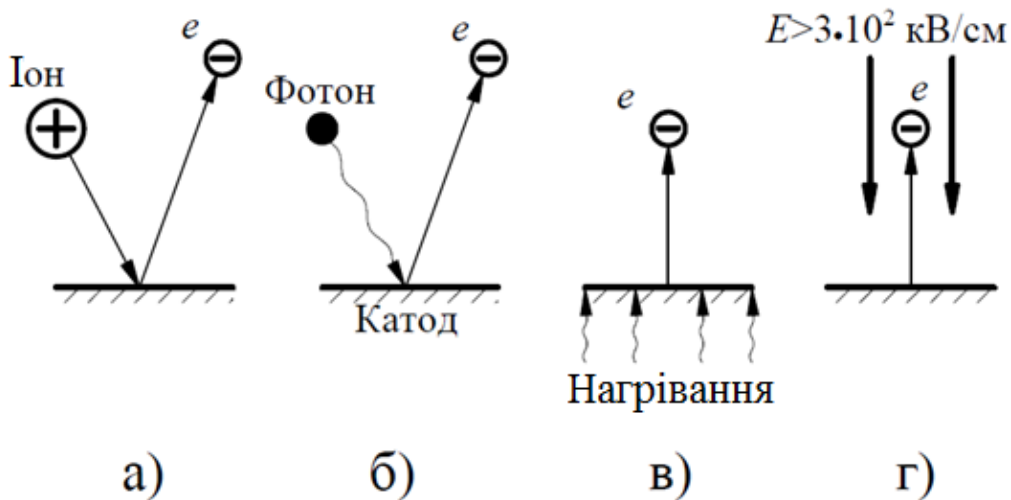


Рис. 1.4. Схеми поверхневої іонізації: а) іонізація іоном; б) іонізація квантом світла; в) термоіонізація; г) автоелектронна іонізація

Для реалізації поверхневої іонізації необхідно, щоб енергія впливу була більшою за енергію виходу електрона з катода $W_{\text{вих}}$. Енергія $W_{\text{вих}}$ нижче енергії об'ємної іонізації газу приблизно у 2 рази і суттєво залежить від матеріалу електрода. Для мідних і сталевих електродів у повітрі робота виходу становить $W_{\text{вих}}=4,5\text{eV}$.

1.4. Лавина електронів

Якщо в газі між двома електродами, що утворюють однорідне поле, з'являється вільний електрон, то, рухаючись до аноду при достатній напруженості електричного поля, він може іонізувати атом або молекулу газу при зіткненні (рис. 1.3, а). У результаті цього з'являється новий (ще один) електрон і позитивний іон. Цей електрон разом із початковим іонізують нові атоми й молекули, і кількість вільних електронів безупинно наростає. Цей процес одержав назву лавини електронів.

Інтенсивність розмноження електронів у лавині характеризується коефіцієнтом ударної іонізації α , що дорівнює числу іонізацій, проведених електроном, на шляху в 1 см у напрямку 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. 1.5 наведено розподіл напруженості електричного поля в проміжку при проходженні його лавиною електронів. Видно, що напруженість електричного поля на фронті лавини зростає, в середній частині, де перебувають позитивні іони, зменшується, а поблизу катода знову незначно збільшується.

Для опису лавинного процесу необхідно визначити кількість електронів у лавині. Припустимо, що з катода за рахунок зовнішнього іонізатора виривається n_0 електронів (наприклад, $n_0 = 1$). На відстані x від катода кількість електронів зросла до n (рис. 1.6). Збільшення кількості електронів dn на шляху dx буде дорівнювати:

$$dn = n \cdot \alpha \cdot dx \quad (1.15)$$

або

$$\frac{dn}{n} = \alpha \cdot dx. \quad (1.16)$$

Інтегруючи (1.17) за n від 1 до n і за x від 0 до x , одержимо:

$$\int_1^n \frac{dn}{n} = \int_0^x \alpha \cdot dx. \quad (1.17)$$

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

$$\ln n = \alpha \times x \quad (1.18)$$

або

$$n = e^{\alpha \times x}. \quad (1.18a)$$

Вираз (1.18) 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 кількість електронів у лавині з урахуванням прилипання буде дорівнювати

$$n = e^{(\alpha - \eta)x}. \quad (1.19)$$

Якщо n_0 більше 1, тоді (1.19) буде мати такий вигляд:

$$n = n_0 \times e^{(\alpha - \eta)x} \quad (1.20)$$

Кількість електронів у лавині $n > 10^7$.

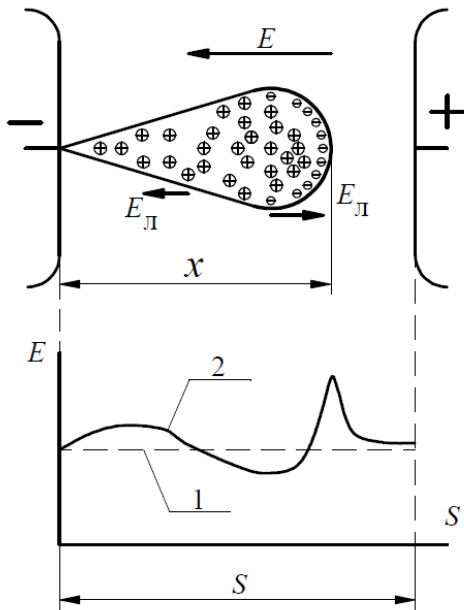


Рис. 1.5. Перекручування електричного поля в проміжку, створюване лавиною: 1 – середня напруженість без лавини; 2 – результуюча напруженість

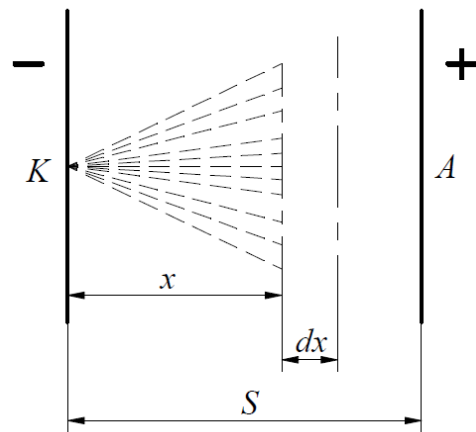


Рис. 1.6. Схема визначення кількості електронів у лавині

1.5. Умова самостійності розряду

Після проходження першої лавини в проміжку лавинний процес може відновитися або згаснути. Для поновлення лавинного процесу потрібний хоча б один вторинний ефективний електрон. Якщо цей електрон виходить під дією зовнішнього іонізатора, розряд називається несамоствійним. Тобто якщо забрати зовнішній іонізатор, то лавинний процес не відновиться й розряд згасне. Якщо ж вторинний ефективний електрон виникає в результаті проходження первинної лавини, розряд називається самоствійним. Розряд із несамоствійного може перейти в самоствійний, якщо збільшити прикладену до електродів напругу.

При самоствійній формі розряду лавинний процес відновлюється, оскільки сама первинна лавина (і наступні вторинні теж) створює умови для поновлення процесу. Умови поновлення:

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

2) збуджені атоми й молекули, що утворюються поряд із іонізацією, випускають фотони, які можуть приводити як до фотоіонізації в об'ємі проміжку, так і до фотоемісії електронів із катода. Вторинні електрони, що утворюються таким чином, приводять до повторного утворення лавини в розрядному проміжку.

Кількість позитивних іонів, що залишилися в проміжку після проходження лавини, дорівнює кількості електронів у лавині (1.19), крім початкового електрона, тобто:

$$n_i^+ = e^{(\alpha-\eta)S} - 1. \quad (1.21)$$

Електрони, вибиті з катода, не всі беруть участь в утворенні вторинних лавин. Частина електронів рекомбінує з позитивними іонами. Сумарний процес утворення вторинних електронів із катода характеризується коефіцієнтом вторинної іонізації γ – другий коефіцієнт Таунсенда. Коефіцієнт γ залежить від матеріалу катода, сполуки й тиску газу і завжди $\gamma \ll 1$. Кількість вторинних електронів, утворених після проходження первинної лавини при самоствійній формі розряду:

$$\gamma(e^{(\alpha-\eta)S}-1) \geq 1. \quad (1.22)$$

Рівняння (1.18) – це умова 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.

1.6. Утворення стримера

У процесі розвитку лавини безупинно збільшується кількість електронів і позитивних іонів. Зі збільшенням кількості електронів у голівці лавини зростає напруженість на фронті лавини (рис. 1.5). На хвості лавини напруженість знижена. Електрони в голівці лавини зупиняються й можуть рекомбінувати із іонами. При рекомбінації випромінюються фотони, які здатні поблизу хвоста первинної лавини іонізувати нейтральні молекули, утворюючи вторинні лавини.

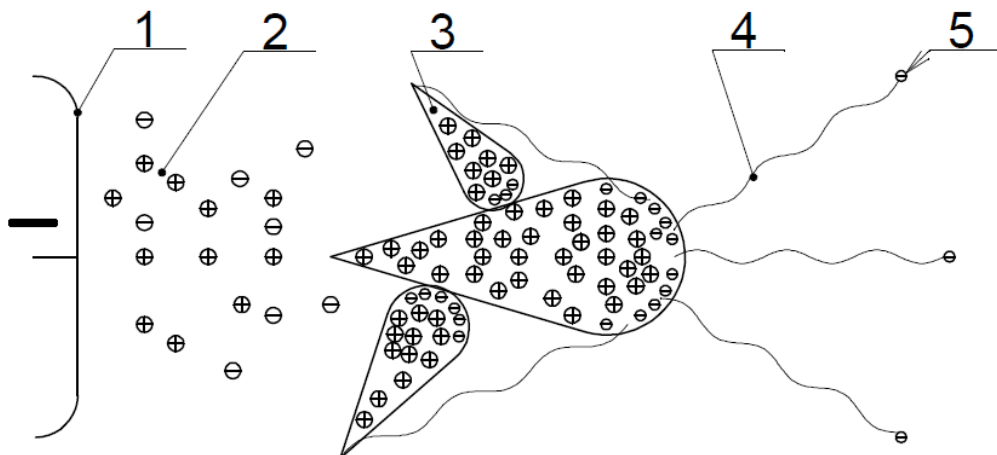


Рис. 1.7. Механізм розвитку катодного стримера: 1 – електрод – катод; 2 – канал стримера; 3 – лавини; 4 – рух фотонів; 5 – електрон за рахунок фотоіонізації

Вторинні лавини, впливаючи по силових лініях і маючи на голівці надлишковий негативний заряд (електрони), втягуються в область позитивного об'ємного заряду, залишеного первинною лавиною. Електрони вторинних лавин змішуються з позитивними іонами первинної лавини й утворюють стример – область із найбільшою щільністю струму, що, розігріваючись, починає світитися. Найбільша концентрація частинок (густина

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

Критерієм переходу лавинного розряду в стримерний є критична кількість електронів у лавині. Розрахунки показують, що при кількості електронів $n_{кр} \geq 10^7 - 10^9$ лавина переходить у стример. 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 стримерну форму розвитку розряду. Необхідно відзначити, що $x_{кр}$ залежить від тиску газу і його складу. Картина утворення стримера наведена на рис. 1.7.

1.7. Закон Пашена

Виконання умови самостійності розряду (1.22) в однорідному полі означає пробій усього проміжку якщо прийнявши $\eta=0$ і (1.22) дорівнює одиниці, одержимо:

$$\gamma(e^{\alpha \cdot S} - 1) = 1 \quad (1.22a)$$

або

$$e^{\alpha \cdot S} = 1 + \frac{1}{\gamma} \quad (1.23)$$

Прологарифмуємо (1.23) і перетворимо відносно α :

$$\alpha = \frac{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}{S} \quad (1.24)$$

Експериментально встановлено, що:

$$\alpha = A_0 P e^{-\frac{B_0 P}{E}}, \quad (1.25)$$

де P – тиск газу; E – напруженість електричного поля; A_0 – коефіцієнт, що залежить від складу газу.

$$A_0 = \frac{\pi \cdot r^2}{kT}, \quad (1.26)$$

де: r – радіус молекул; k – постійна Больцмана;

T – температура в градусах Кельвіна.

B_0 – коефіцієнт, що залежить від енергії іонізації газу,

$$B_0 = A_0 U_1, \quad (1.27)$$

де U_1 – потенціал іонізації газу.

Прирівнявши вирази для α (1.24) і (1.25), одержимо:

$$\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) = A_0 \cdot P \cdot S \cdot e^{-\frac{B_0 P}{E}}. \quad (1.26)$$

Підставивши в (1.26) $E = U/S$, маємо:

$$\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) = A_0 \cdot P \cdot S \cdot e^{-\frac{B_0 P \cdot S}{U}} \quad (1.27)$$

або

$$e^{-\frac{B_0 P \cdot S}{U}} = \frac{A_0 \cdot P \cdot S}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}. \quad (1.28)$$

Прологарифмуємо (1.28), тоді

$$\frac{B_0 \cdot P \cdot S}{U} = \ln \frac{A_0 \cdot P \cdot S}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}. \quad (1.29)$$

Оскільки нас цікавить напруга, при якій відбудеться пробій, дорівнюємо $U = U_{\text{пр}}$. Тоді з (1.29)

$$U_{\text{пр}} = \frac{B_0 \cdot P \cdot S}{\ln \frac{A_0 \cdot P \cdot S}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}}. \quad (1.30)$$

З (1.26) видно, що при незмінній температурі розрядна напруга в однорідному полі є функцією добутку тиску P на відстань між електродами S , тобто:

$$U_{\text{пр}} = f(P \times S). \quad (1.31)$$

Цю закономірність уперше експериментально виявив Ріллей. Вираз (1.30) називається законом Пашена. Графічно ця закономірність відображена на рис. 1.8. Вигляд цієї залежності можна пояснити, виходячи з фізичних міркувань. При $S = \text{const}$ збільшення тиску приводить до збільшення кількості зіткнень

електронів із нейтральними атомами й молекулами і, як наслідок, до зменшення його енергії, що накопичується при проходженні довжини вільного пробігу. Отже, для виникнення ударної іонізації необхідно збільшити напругу $U_{\text{ПР}}$. З іншого боку, при тисках, менших за мінімальне значення, збільшується довжина вільного пробігу і енергія, що накопичується електроном, але зменшується кількість зіткнень, що зменшує імовірність ударної іонізації. Для її збільшення необхідно, щоб як найбільша кількість зіткнень завершувалась іонізацією. Для цього необхідно збільшувати енергію електрона на довжині вільного пробігу, тобто збільшувати $U_{\text{ПР}}$.

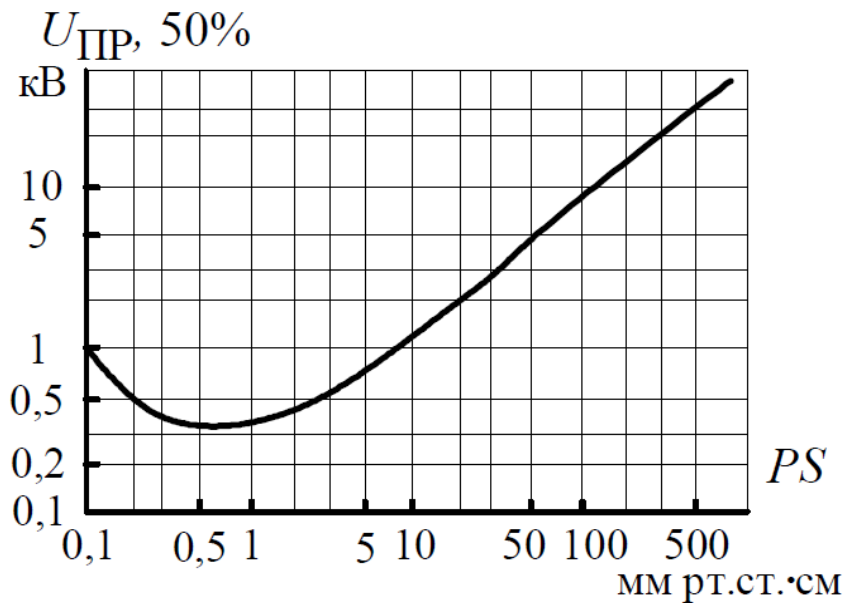


Рис. 1.8. Графічне відображення закону Пашена для повітря

Закон Пашена у вигляді формули (1.26) справедливий при нормальній температурі. Зміна температури діє обернено пропорційно зміні тиску й повинна враховуватися при розрахунках. У загальному вигляді з урахуванням зміни температури закон Пашена запишеться так:

$$U_{\text{ПР}} = f\left(\frac{P \cdot S}{T}\right) \quad (1.32)$$

або

$$U_{\text{пр}} = f(\delta \cdot S), \quad (1.33)$$

де

$$\delta = \frac{T_0}{T} \cdot \frac{P}{P_0} = 0,386 \frac{P}{T}, \quad (1.34)$$

T – температура в градусах Кельвіна.

Тоді $U_{\text{пр.д.}} = U_{\text{пр.р.}} \times \delta$, де $U_{\text{пр.д.}}$ – пробивна напруга, приведена до дійсних умов вимірювання; $U_{\text{пр.р.}}$ – 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 більших значеннях PS відмінність пояснюється збільшенням напруженості електричного поля на мікроступах електродів і збільшенням імовірності виникнення лавин, що знижує $U_{\text{пр}}$.

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 відповідного мінімуму, аж до вакууму.

1.8. 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 із неоднорідним полем належать стрижень – стрижень, стрижень – площина, провідник – земля й багато інших реальних ізоляційних проміжків.

На рис. 1.9 наведені залежності напруженості електричного поля від відстані між електродами типу стрижень – площина.

Основні закономірності розвитку розряду в будь-яких різконеоднорідних полях ($K_H > 4$) практично однакові. При деякій початковій напрузі U_H у проміжку виникає самостійний розряд у лавинній формі, тому що поблизу стрижня є область із напруженістю, що перевищує значення E_H^* , що відповідає

виникненню самостійної форми розряду (рис. 1.9). 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 автоелектронної (холодної) 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_H , коли кількість електронів у лавині зростає до $10^7 - 10^9$, вона переходить у стан плазми і в проміжку біля електрода виникає стример із підвищеною напруженістю поля. Якщо в однорідному полі стример, що виник, перетинає весь міжелектродний проміжок, то в різконеоднорідному полі залежно від величини напруги стример, пройшовши деяку відстань, може зупинитися. При цьому плазма його розпадається, але поблизу вістря виникають нові стримери, які також зупиняються і їхня плазма розпадається.

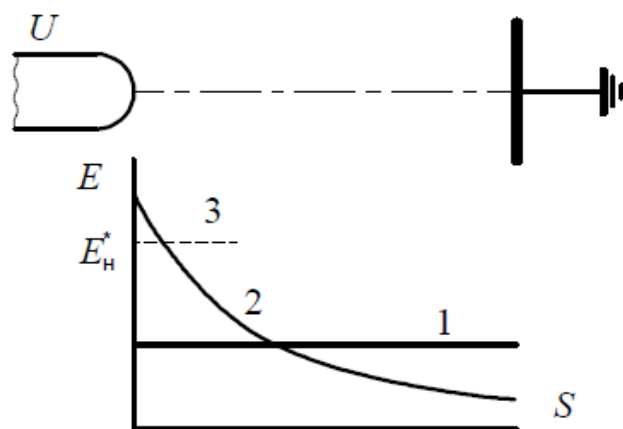


Рис. 1.9. Залежність напруженості електричного поля від відстані між електродами типу стрижень-площина:
 1 – $E_{CP} = f(S)$;
 2 – $E_{MAX} = f(S)$; 3 – E_H^* – напруженість виникнення самостійної форми розряду електрода з підвищеною напруженістю (вістря) до

Такий стан розряду стійкий, тому що виконується умова самостійності розряду. Випадок, коли стримери не досягають протилежного електрода, одержав назву *коронного розряду в стримерній формі*.

Для пробою всього міжелектродного проміжку необхідно ще збільшити напругу. Тоді утвориться канал, що просувається від

протилежного електрода. При перетині іскровим каналом усього проміжку він перетвориться в електричну дугу, що означає завершення пробою. У різконеоднорідних полях напруга пробою завжди більше напруги виникнення коронного розряду в будь-якій формі.

1.9. Ефект полярності

У слабонерівномірних полях, де мінімальний і середній градієнти напруги мало відрізняються між собою, коронна й розрядна напруги практично збігаються одна з одною, вплив полярності невеликий. У сильонерівномірному полі коронна напруга набагато нижче за розрядну, 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, проводять ударну іонізацію й утворюють лавину електронів. Коли лавина доходить до вістря, електрони лавини нейтралізуються на аноді, а позитивні іони внаслідок малої швидкості руху залишаються біля вістря і створюють позитивний об'ємний заряд, що має власне електричне поле. Взаємодіючи із зовнішнім полем у проміжку, позитивний об'ємний заряд послаблює поле поблизу вістря й підсилює його в іншій частині проміжку (рис. 1.10, а). 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 стримера, заповнений плазмою. Запалюється стримерний коронний розряд. Позитивні заряди цієї лавини будуть розташовуватися на голівці стримера й створювати область підвищеної напруженості в зовнішньому просторі. Наявність області сильного поля забезпечує утворення нових лавин, електрони яких втягуються в канал стримера, поступово подовжуючи його. Стример проростає до катода, викликаючи пробій проміжку при порівняно малій величині розрядної напруги.

При негативній полярності вістря електричне поле безпосередньо біля нього приводить до емісії електронів із катода, які відразу потрапляють у сильне поле і проводять ударну іонізацію, утворюючи велику кількість лавин. Електрони лавин, переміщаючись у слабке поле анода, втрачають швидкість, захоплюються нейтральними молекулами, які стають негативними іонами, розсіяними в просторі. Позитивні іони лавин утворюють об'ємний заряд біля вістря, що, взаємодіючи із зовнішнім полем, буде збільшувати тут напруженість і зменшувати її в іншій частині проміжку (рис. 1.10, б). Збільшення поля біля вістря приводить до посилення емісії електронів із поверхні катода, які, змішуючись із позитивним об'ємним зарядом, утворюють біля катода зародок катодного стримера.

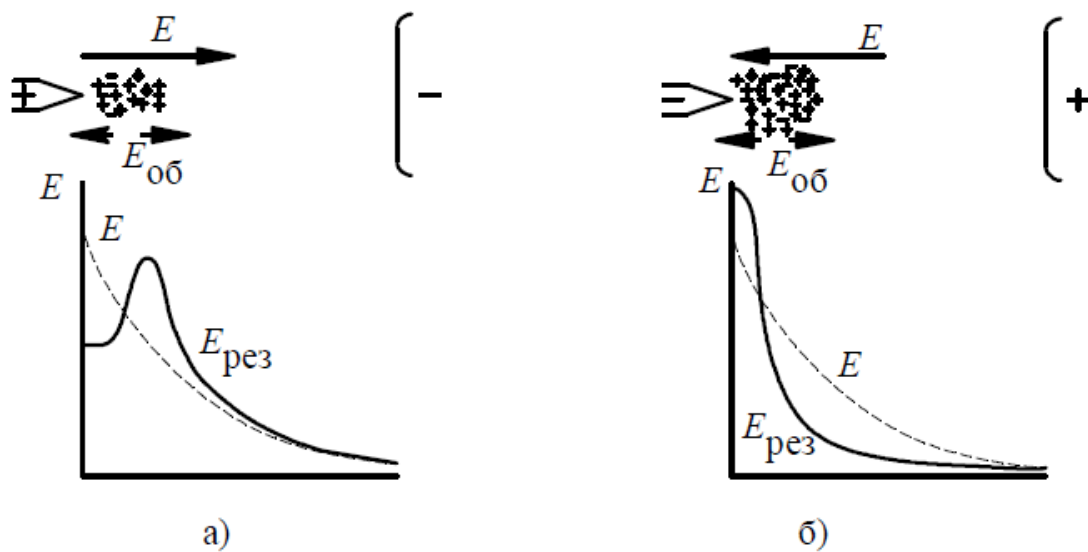


Рис. 1.10. Утворення анодного а) і катодного б) стримера:

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

Внаслідок великої кількості початкових лавин у катода плазмовий канал тут являє собою більш-менш однорідний шар із радіусом кривизни більшим, ніж у вістря. Тому електричне поле трохи вирівнюється й напруженість у зовнішній області зменшується.

Зменшення напруженості електричного поля в зовнішньому просторі приводить 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 плазменого шару, велика кількість лавин, що утворюються приводить до подовження стримера. Однак так само, як і на початку, завдяки великій кількості лавин голівка стримера розмита, і зростання напруженості на голівці стримера виявляється набагато меншим, ніж при позитивному вістрі.

Внаслідок розглянутих вище особливостей розвиток стримера при негативному вістрі відбувається з більшими труднощами, тому розрядна напруга при негативній полярності вістря більше, ніж при позитивній полярності (у 2-2,5 рази).

При змінній напрузі пробій відбувається завжди на позитивній полярності.

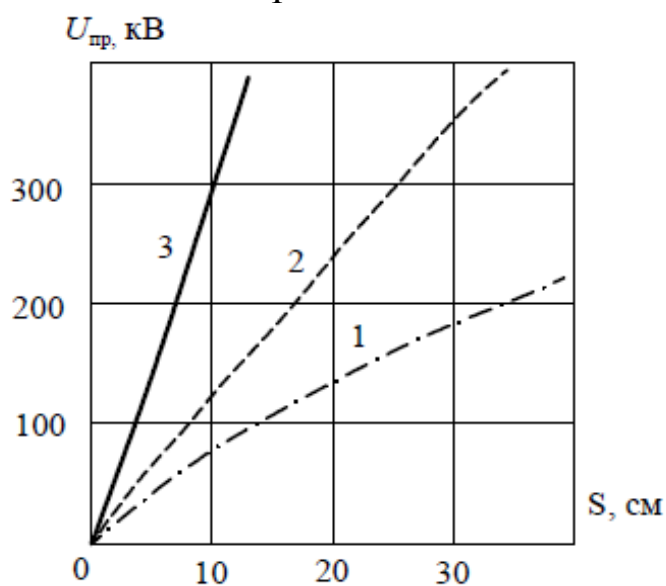


Рис. 1.11. Залежність пробивної напруги від відстані між електродами стрижень-площина на імпульсній напрузі: 1 – позитивна полярність вістря; 2 – негативна полярність вістря; 3 – однорідне поле

1.10. Бар'єрний ефект

Істотний вплив об'ємного заряду на розвиток розряду в проміжку з різконерівномірним полем використовується на практиці для збільшення розрядних напруг ізоляційних проміжків. Це досягається розміщенням у проміжку 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 приводить до більш рівномірного розподілу напруженості в проміжку між бар'єром і площиною (рис. 1.12, а) і, отже, до значного збільшення розрядної напруги.

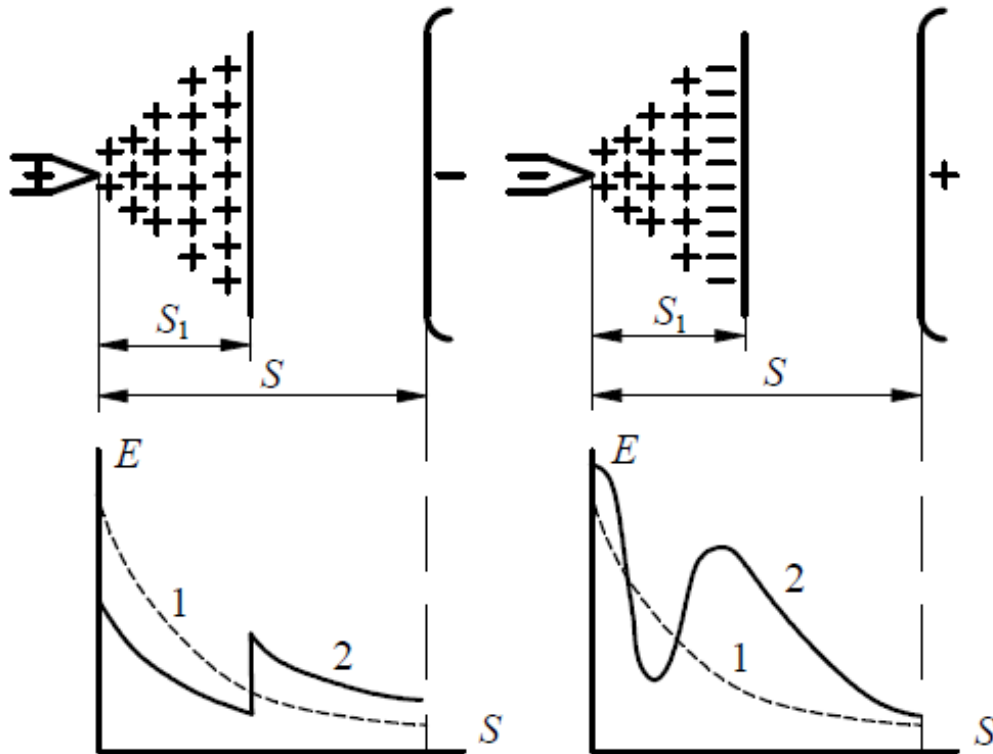


Рис. 1.12. Розподіл напруженості поля в міжелектродному проміжку при наявності бар'єра: а) – позитивна полярність стрижня; б) – негативна полярність стрижня; 1 – розподіл напруженості поля без бар'єра; 2 – розподіл напруженості поля з бар'єром

При від'ємній полярності стрижня електрони, рухаючись від вістря, попадають на бар'єр, втрачають швидкість і більшість із них разом з атомами кисню стають від'ємними іонами. На бар'єрі в цьому випадку з'являється концентрований від'ємний заряд, що збільшує напруженість поля не тільки між позитивним об'ємним зарядом біля вістря і бар'єром, але й у зовнішньому просторі (рис. 1.12, б). Тому при від'ємній полярності вістря збільшення розрядної напруги в проміжку при наявності бар'єра буде незначним. При розташуванні бар'єра в середній частині проміжку розрядні напруги як при від'ємній, так і позитивній полярності 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 з іншої сторони бар'єра. Бар'єр, розташований у безпосередній близькості від негативного вістря, не здатний затримувати швидкі електрони з вістря, які проходять крізь бар'єр.

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 у 2 рази порівняно із проміжком без бар'єра (рис. 1.13).

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

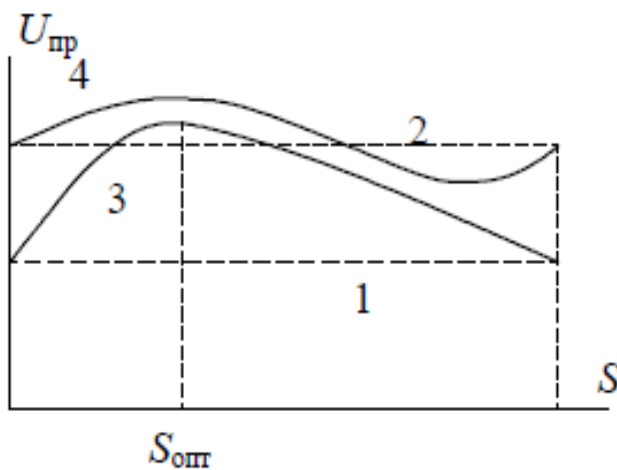


Рис. 1.13. Вплив бар'єра на пробивну напругу газопроміжку при позитивній (1, 3) і негативній (2, 4) полярностях напруги: 1, 2 – пробивна напруга проміжку без бар'єра; 3, 4 – пробивна напруга проміжку з бар'єром

1.11. Вольт-секундна характеристика

При короткочасних імпульсах значення розрядної напруги повітряних проміжків залежить від тривалості впливу. Якщо до проміжку прикладена напруга, достатня для пробою, то для розвитку й завершення розряду в проміжку необхідний певний час t_p , який називається часом розряду (див. рис. 1.14).

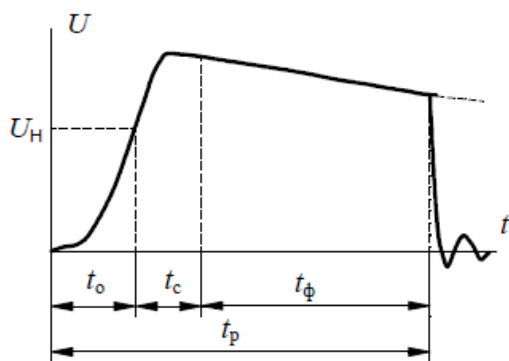


Рис. 1.14. Часова структура розвитку розряду при імпульсній напрузі

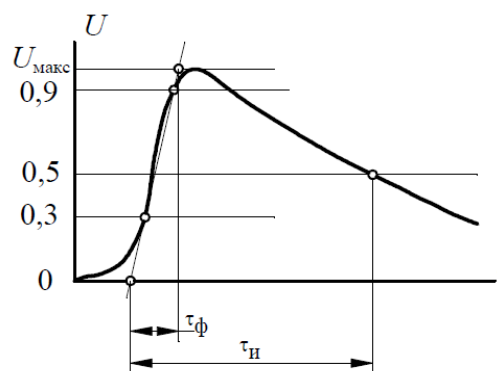


Рис. 1.15. Визначення параметрів імпульсу напруги

Розвиток самостійного розряду починається з появи в проміжку ефективного початкового електрона, що є випадковою подією. Час очікування ефективного електрона t_c має певний розкид і тому називається статистичним часом запізнення розряду. Це перша складова часу розряду. Інша складова, що має також статистичний характер, – це час формування розряду t_ϕ , тобто час від моменту появи початкового електрона до завершення пробною проміжку. Час $t_c + t_\phi = t_z$ називають часом запізнення розвитку розряду.

При досить великій тривалості фронту імпульсу має значення також час t_0 , що являє собою час підйому напруги до значення U_H . Таким чином, у загальному випадку час розряду визначається так:

$$t_p = t_0 + t_c + t_\phi. \quad (1.35)$$

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 зменшується. 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 менший 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 випробовувань і можливості зіставлення ізоляційних конструкцій встановлено стандартний грозовий імпульс із тривалістю фронту (зростання напруги) $\tau_{\phi} = 1,2 \pm 0,4$ мкс і тривалістю імпульсу $\tau_i = 50 \pm 10$ мкс і позначається 1,2/50 мкс (рис. 1.15).

Для експериментального визначення вольт-секундної характеристики до досліджуваного проміжку прикладаються імпульси стандартної форми. При кожному значенні напруги імпульсу виконується серія дослідів. Внаслідок статистичного розкиду часу розряду вольт-секундна характеристика одержується у вигляді області точок (рис. 1.16), для якої вказуються середня крива і межі розкиду часу розряду.

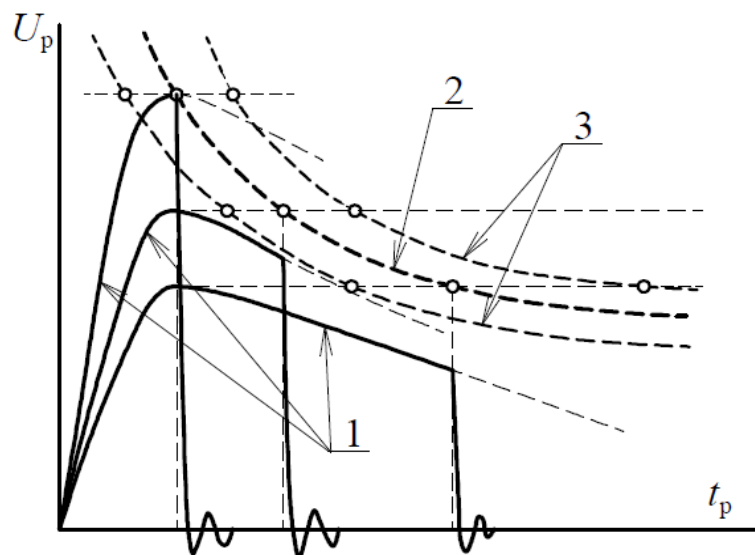


Рис. 1.16. Побудова вольт-секундної характеристики ізоляції за дослідними даними (грозові імпульси): 1 – імпульс напруги; 2 – крива середніх значень пробивної напруги; 3 – межі розкиду пробивних напруг

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. 1.17, крива 1) і тільки при розряді 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 і відсутній короні. Зазначені властивості вольт-секундної характеристики дозволяють використати проміжок між кульовими електродами, що створюють практично однорідне поле, якщо відстань між електродами менша за їхній радіус, як універсальний прилад для вимірювання максимальних значень напруги.

Вольт-секундні характеристики проміжків із різконеоднорідним полем (рис. 1.17, крива 2) мають більшу крутизну, оскільки в таких проміжках час формування розряду суттєво 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 $K_{имп} = U_p / U_{\sim}$ називається коефіцієнтом імпульсу.

Проміжки з однорідним і слабонеоднорідним полями мають коефіцієнт імпульсу $K_{имп} = 1$ практично у всьому діапазоні часів розряду.

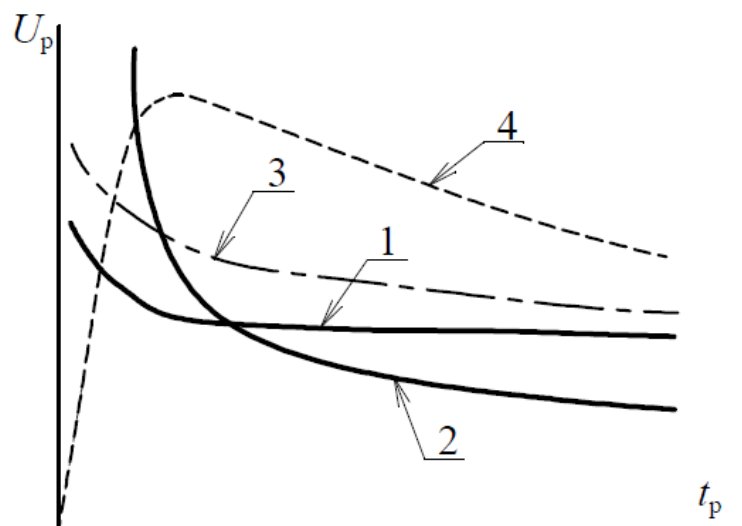


Рис. 1.17. ВСХ захисних розрядників і ізоляції: 1 – ВСХ вентильного розрядника (однорідне поле); 2 – ВСХ трубчастого розрядника (різконеоднорідне поле); 3 – ВСХ об'єкта, що підлягає захисту; 4 – імпульс напруги

Вольт-секундні характеристики широко використовуються для координації ізоляції високовольтного устаткування, тобто

для захисту від впливу грозових і комутаційних перенапруг. Із цією метою паралельно об'єкту, що підлягає захисту, вмикається повітряний розрядник (наприклад вентиляний розрядник) із положою ВСХ. Надійний захист буде забезпечуватися, якщо ВСХ розрядника (рис. 1.17, крива 1) лежить нижче ВСХ устаткування, що підлягає захисту (крива 3), у всьому діапазоні часів впливаючих напруг.

1.12. Коронний розряд

Коронний розряд – це самостійний розряд, при якому ударна іонізація електронами має місце не на всій довжині проміжку, а лише в його частині біля електродів. Коронний розряд може мати лавинну й стримерну форму. Пробій коронуючого проміжку відбувається при напрузі, більшій за початкову.

Корона становить інтерес у зв'язку із втратами енергії при коронуванні ЛЕП. Наприклад, на лініях надвисокої напруги втрати енергії при коронуванні проводів ЛЕП у погану погоду становлять 100-200 кВт на кілометр лінії й більше. Крім цього, продукти іонізації повітря руйнують ізоляцію й металеву арматуру. Коронний розряд також є джерелом акустичного шуму й високочастотного електромагнітного випромінювання (спектр частот 0,154-100 МГц), що створює перешкоди радіо- і телеприймання.

При коронному розряді відбувається іонізація повітря і біля поверхні проводів утворюється об'ємний заряд того ж знака, що і полярність напруги проводу. Під дією сил електричного поля іони, що складають об'ємний заряд, рухаються від проводу. Для їхнього пересування необхідні витрати енергії, які й визначають в основному втрати енергії на корону, оскільки витрати енергії на іонізацію повітря значно менші.

При постійній напрузі розрізняють уніполярну й біполярну корону. Якщо коронує один провід – уніполярна корона.

При уніполярній короні заряди, що генеруються нею мають той же знак, що й коронуючий провід, під дією електричного поля спрямовуються до землі, де відбувається їхня нейтралізація.

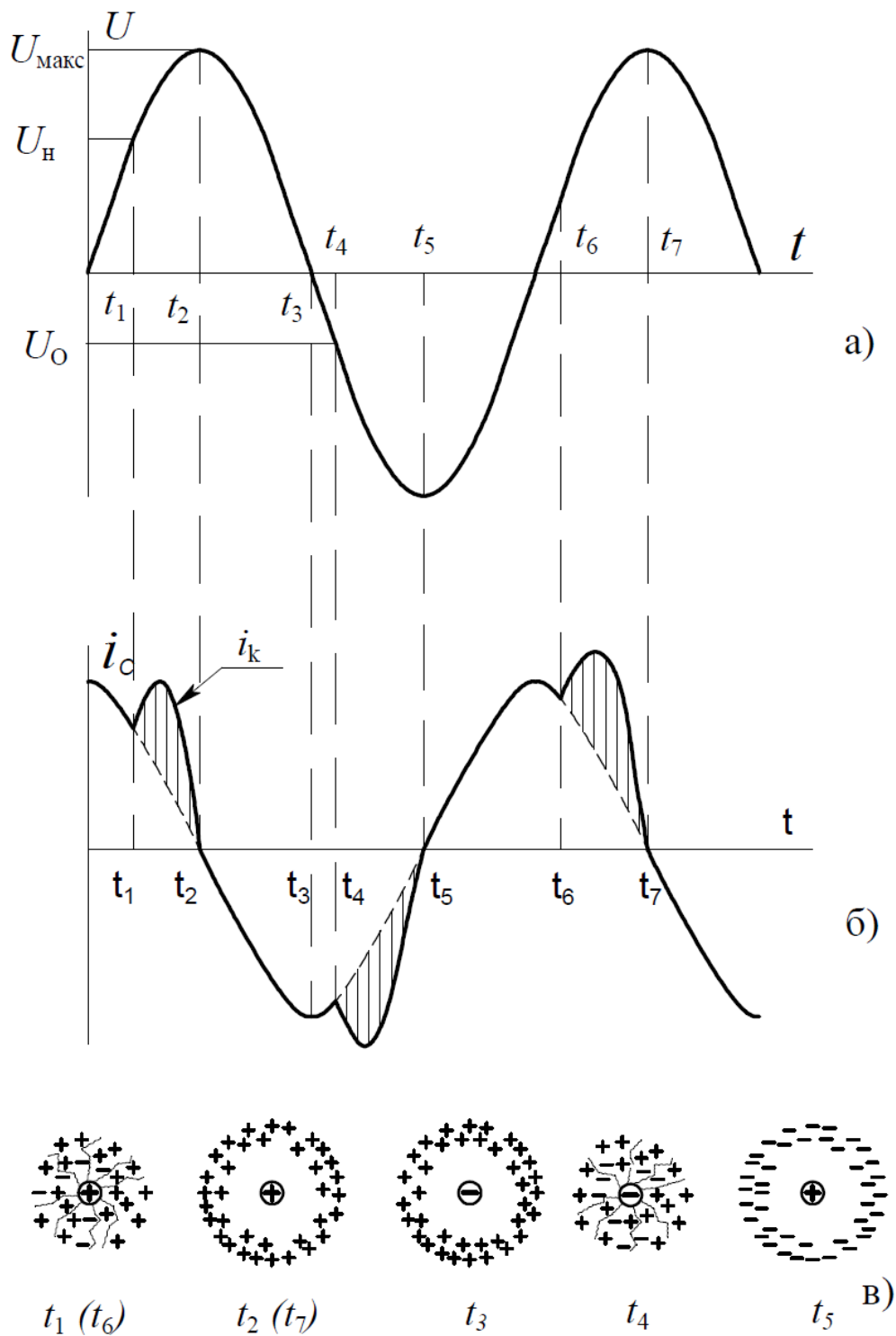


Рис. 1.18. Розвиток корони при змінній напрузі

При біполярній короні об'ємні заряди проводів різної полярності рухаються назустріч один одному. При зустрічі відбувається рекомбінація іонів різних знаків. Частина іонів

проникає в простір поблизу протилежного проводу, що приводить до посилення інтенсивності коронування. Це збільшує втрати на корону.

При змінній напрузі коронний розряд запалюється при досягненні початкової напруги, що дорівній напрузі запалювання корони U_n при часі t_1 (рис. 1.18, а). Навколо проводу утворюється зона іонізації, названа чохлом корони (рис. 1.18, в). Із чохла корони позитивні заряди (як на рис. 1.18, в) виносяться в навколишній простір і утворюють зовнішній об'ємний заряд (ОЗ). Процес коронування триває доти, доки напруга не досягне $U_{\text{макс}}$ при t_2 .

Незважаючи на підвищення напруги до $U_{\text{макс}}$, напруженість на проводі залишається постійною й дорівнює E_n через вплив об'ємного заряду. Потім напруга починає знижуватися. Синхронно знижується й напруженість на проводі, що приводить до згасання корони. Але після згасання корони (після t_2) у просторі навколо проводу залишається позитивний зовнішній об'ємний заряд, що віддаляється від нього (рис. 1.18, в).

Відстань, на яку віддаляється об'ємний заряд, залежить від напруги на проводі й становить $\sim 40\text{--}100$ см. Різниця потенціалів між проводом і ОЗ збільшується в міру зменшення напруженості на проводі до часу t_3 . При t_4 (рис. 1.18, а, в), коли напруга досягає U_0 , що значно менше U_n , 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. 1.18, а, в). У момент часу t_5 (початок зменшення напруги) негативна корона згасає. Надалі всі ці цикли повторюються й запалювання корони на обох полярностях відбувається при U_0 .

Між проводами й землею має місце ємність C , що заряджається й розряджається із частотою змінного струму. При цьому між проводами і землею протікає ємнісний струм i (рис. 1.18, б):

$$i_C = C \frac{du}{dt}. \quad (1.35)$$

Виникнення коронного розряду в момент t_1 приводить до появи струму корони i , що накладається на ємнісний струм лінії й спотворює синусоїду струму (рис. 1.18, б). 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 однакових умов втрати енергії на корону істотно більші.

На характеристики коронного розряду – початкову напругу, втрати енергії, радіоперешкоди, шум – значний вплив мають погодні умови. Атмосферні опади різко знижують початкову напругу виникнення корони.

1.13. Втрати енергії при коронуванні

При проектуванні ЛЕП користуються розрахунковими залежностями втрат енергії при коронуванні. Розповсюдженою формулою для розрахунку втрат на корону при змінній напрузі є емпірична формула Піка для одиночного проводу

$$P = \frac{24,1}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r_0}{S}} (U_\phi - U_k)^2 \cdot 10^{-5}, \text{ кВт/км} \times \text{фаза} \quad (1.36)$$

де δ – відносна густина повітря; f – частота, Гц; r_0 – радіус одиночного проводу, см; S – відстань між проводами, см; U_ϕ – діюче значення фазної напруги, кВ; U_k – напруга виникнення корони, кВ.

$$U_k = 21,2 \cdot \delta \cdot \ln \frac{S}{r_0} \cdot m_1 \cdot m_2, \text{ кВ} \quad (1.37)$$

де m_1 – коефіцієнт гладкості проводу; m_2 – коефіцієнт погоди.

Для ідеально гладкого проводу $m_1 = 1$, для реального витого проводу $m_1 = 0,85 \div 0,92$ (залежить від конфігурації проводу). Звичайно приймають $m_1 \times m_2 = 0,8$ – при поганій погоді.

На лініях електропередачі надвисокої напруги використовують розщеплені проводи у фазах. Для визначення втрат при коронуванні для розщеплених проводів використовують формулу Майра:

$$P_K = \kappa n f r_0^2 E_e (E_e - E_K) \left(2,31 \lg \frac{1350 E_e}{f r_0} - 1 \right) \times 10^{-5}, \text{ кВт/км} \times \text{фаза} \quad (1.38)$$

де n – кількість проводів у фазі; f – частота, Гц; r_0 – радіус одиночного проводу, см; E_K – напруженість виникнення корони, кВ/см; E_e – еквівалентна напруженість, кВ/см; κ – коефіцієнт погоди.

$$E_e = \frac{E_{\text{макс}} + E_{\text{ср}}}{2} \quad (1.39)$$

Середня напруженість для розщепленого проводу

$$E_{\text{ср}} = \frac{U_{\text{ср}}}{n r_0 \ln \frac{S}{r_{\text{екв.}}}} \quad (1.40)$$

Максимальна напруженість

$$E_{\text{макс}} = k_y \times E_{\text{ср}}, \quad (1.41)$$

де

$$k_y = 1 + (n - 1) \frac{r_{\text{екв.}}}{r_p} \quad (1.42)$$

$$r_{\text{екв.}} = \sqrt[n]{n r_0 r_p^{n-1}} \quad (1.43)$$

$r_{\text{екв.}}$ – еквівалентний радіус одиночного проводу, що має ту ж ємність, що й розщеплена фаза; r_p – радіус розщеплення фази.

Недоліком формули Майра є те, що все різноманіття погодних умов зводиться до двох груп погоди: «гарна» погода ($\kappa = 44$; $E_K = 17$ кВ/см) і «погана» погода ($\kappa = 31,5$; $E_K = 11$ кВ/см).

1.14. Розряд у повітрі по поверхні ізоляторів

Розглянемо вплив твердого діелектрика на виникнення й розвиток розряду в повітрі уздовж поверхні ізолятора. У

конструкції (рис. 1.19, а) силові лінії електричного поля паралельні поверхні діелектрика й поле однорідне. У конструкції (рис. 1.19, б) поле неоднорідне й тангенціальна складова напруженості поля на поверхні діелектрика E_τ переважає над нормальною складовою E_n . У конструкції (рис. 1.19, в) 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 й третя конструкції зустрічаються часто (опорні й прохідні ізолятори).

В ізоляційній конструкції (рис. 1.19, а) електрична міцність проміжку з діелектриком менша, ніж 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 вкрита найтоншою плівкою води. Іони, що утворюються в цій плівці під дією електричного поля, переміщуються до електродів. У результаті цього поле поблизу електродів підсилюється, а всередині проміжку послаблюється. Посилення поля в електродах приводить до зниження електричної міцності проміжку. Це зниження тим більше, чим більш гігроскопічний діелектрик.

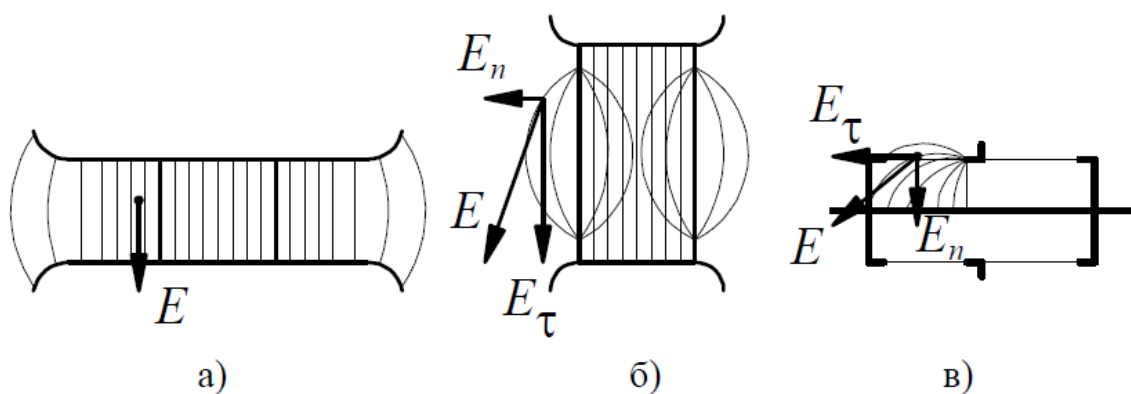


Рис. 1.19. Характерні конструкції повітряних проміжків із твердим діелектриком

Наприклад, скло більш гігроскопічний матеріал, ніж глазурована порцеляна, тому напруга перекриття уздовж поверхні скла нижче, ніж уздовж порцеляни.

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

Для збільшення розрядної напруги проміжку із твердим діелектриком використовують малогігроскопічні діелектрики або створюють покриття з малогігроскопічних матеріалів, що захищають діелектрик від контакту з парами води (наприклад глазурування поверхні порцеляни), а також забезпечити надійне, без мікрозазорів, сполучення тіла ізолятора з металевими арматурами, використовуючи цементні вставки і еластичні провідні прокладки.

В ізоляційній конструкції (рис. 1.19, б) поле неоднорідне, отже, як і у випадку чисто повітряного проміжку, розрядна напруга менша, ніж в однорідному полі. Вплив гігроскопічності діелектрика й мікрозазорів тут якісно такий самий, як і в конструкції (рис. 1.19, а), але він слабше виражений, тому що електричне поле й без того істотно неоднорідне. При досить великій неоднорідності поля в цій ізоляційній конструкції, як і в чисто повітряному проміжку, виникає коронний розряд. Оксиди азоту, що утворюються при цьому, і озон впливають на твердий діелектрик. Найбільш небезпечний коронний розряд для полімерної ізоляції, особливо якщо він має стримерну форму. Температура в каналі стримера досить висока, і зіткнення його з поверхнею діелектрика може приводити до термічного розкладання діелектрика й утворення обвугленого сліду з підвищеною провідністю. Довжина цього сліду (треку) згодом

зростає, що приводить до перекриття ізолятора з незворотною втратою ним електричної міцності.

Все вищесказане справедливо й для конструкції на (рис. 1.19, в). Більша нормальна складова електричного поля сприяє зближенню каналу стримера з поверхнею діелектрика, що підвищує ймовірність ушкодження діелектрика. Електрична міцність цієї конструкції ще менша, ніж конструкції (рис. 1.19, б). Канали стримерів, що розвиваються уздовж поверхні діелектрика, мають значно більшу ємність відносно внутрішнього (протилежного) електрода, ніж у конструкції з перевагою тангенціальної складової нуля. Тому через стримерні канали проходить порівняно великий струм. При певному значенні напруги струм зростає настільки, що температура стримерних 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 ковзного розряду.

Провідність каналу ковзного розряду значно більша за провідності каналу стримера. Тому падіння напруги в каналі ковзного розряду менше, а на неперекритій частині проміжку більше, ніж у каналах стримера. Збільшення напруги на неперекритій частині проміжку приводить до подовження каналу ковзного розряду

$$l_{\text{СК}} = \chi_1 \cdot C^2 \cdot U^5 \sqrt[4]{\frac{dU}{dt}}, \quad (1.44)$$

де χ_1 – коефіцієнт, визначений дослідним шляхом; C – питома поверхнева ємність (ємність поверхні діелектрика, по якій розвивається розряд, відносно протилежного електрода);

U – прикладена напруга.

З (1.44) при підстановці замість $l_{\text{СК}}$ відстані між електродами по поверхні діелектрика L можна визначити значення напруги U_p , необхідної для перекриття ізолятора. Якщо ж прийняти $C = \varepsilon \varepsilon_0 S / d$, де d – товщина діелектрика, а площа S прийнята такою, що дорівнює 1 см^2 , і вважати значення Ud / dt постійним, що в першому наближенні відповідає сталості частоти

прикладеної напруги, з (1.44) одержимо вираз для знаходження розрядної напруги:

$$U_p = \chi \cdot L^{0,2} \left(\frac{d}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \right)^{0,4}, \quad (1.45)$$

який називається формулою Теплера.

З (1.45) випливає, що зростання 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 приводить до збільшення розрядних напруг.

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

1.14.1. Розряд уздовж провідної й забрудненої поверхні ізолятора

В умовах експлуатації поверхні ізоляторів завжди забруднюються. Як правило, сухі забруднення, що мають високий опір і не впливають на розподіл напруги, по поверхні ізолятора не знижують помітно його розрядну напругу. Зволоження шару забруднення дощем або росою приводить до зменшення опору шару забруднення, зміни розподілу напруги по поверхні ізолятора й у результаті – до зниження його розрядної напруги.

Механізми перекриття ізолятора під дощем і при забрудненій і зволоженій поверхні подібні. Розглянемо розвиток розряду у випадку, коли поверхня ізолятора забруднена й зволожена.

Під дією прикладеної до ізолятора напруги по зволоженому шару забруднення проходить струм витoku, що нагріває його.

Оскільки забруднення розподілене по поверхні ізолятора нерівномірно і щільність струму витоку неоднакова на окремих ділянках ізолятора через складну конфігурацію його поверхні, то нагрівання шару забруднення відбувається також нерівномірно. На тих ділянках ізолятора, де щільність струму найбільша, відбувається інтенсивне випаровування води і утворюються підсушені ділянки з підвищеним опором. Розподіл напруги по поверхні ізолятора зміниться. Майже вся напруга, що впливає на ізоляцію, виявляється прикладеною до підсушених ділянок. У результаті цього підсушені ділянки перекриваються іскровими каналами, названими частковими дугами, що перемежуються. Опір іскрового каналу менше, ніж опір підсушеної ділянки поверхні ізолятора, тому струм витоку зростає. Зростання струму витоку приводить до подальшого підсушування шару забруднення, а отже, і до збільшення його опору.

Інтенсивне підсушування поверхні ізолятора біля кінців дуг приводить до їхнього подовження. Підсушування всієї поверхні веде до зниження струму витоку, а збільшення довжини часткових дуг до його зростання.

Якщо результатом цього буде зменшення струму витоку, то дуги згаснуть, якщо ж струм витоку буде зростати, то часткові дуги будуть подовжуватися й перекриють весь ізолятор. Оскільки параметри часткової дуги й кількість дуг, що одночасно існують на поверхні ізолятора, випадкові, то й перекриття також є випадковою подією, яка характеризується певною ймовірністю. Ймовірність перекриття ізолятора підвищується зі збільшенням напруги, тому що при цьому зростає струм витоку, що сприяє подовженню часткових дуг до повного перекриття ізолятора.

З наведеної картини розвитку розряду впливає, що розрядні напруги ізоляторів будуть тим вище, чим менше струм витоку:

$$I_Y = \frac{U}{R_Y}, \quad (1.46)$$

де I_Y – струм витоку по ізолятору; R_Y – опір витоку по поверхні ізолятора.

Якщо шар бруду має товщину Δ з питомим об'ємним опором ρ , то для циліндричного гладкого ізолятора діаметром D :

$$R_Y = \frac{\rho \cdot L_Y}{\pi \cdot \Delta \cdot D}, \quad (1.47)$$

де L_Y – довжина шляху витoku.

З (1.46) і (1.47) випливає, що:

$$I_Y = \frac{U \cdot \pi \cdot \Delta \cdot D}{\rho \cdot L_Y}. \quad (1.48)$$

Отже, розрядна напруга ізолятора буде зростати зі збільшенням довжини шляху витoku й зменшенням діаметра ізолятора:

$$U_{\text{вл.р}} = \frac{I_Y \cdot \rho \cdot L_Y}{\pi \cdot \Delta \cdot D}. \quad (1.49)$$

Оскільки процеси підсушування поверхні ізолятора відбуваються відносно повільно, то при короткочасних перенапругах вони не встигають розвинути й напруга перекриття буває вище, ніж при тривалому впливі напруги.

Вологорозрядна напруга ізолятора залежить від характеристик шару забруднення, його кількості й складу, а також від інтенсивності й виду зволоження. Велика розмаїтість видів забруднення, що зустрічаються в умовах експлуатації, не дозволяє вибрати єдине, "стандартне" забруднення, яке можна було б наносити на поверхню ізоляторів при визначенні вологорозрядних напруг. Найбільш правильно розрядні напруги в реальних умовах забруднення й зволоження можуть бути визначені з досвіду експлуатації.

1.15. Пробій рідких діелектриків

Рідкі діелектрики, володіючи значно вищою електричною міцністю порівняно з газами, знайшли дуже широке застосування як високовольтна ізоляція в різноманітних пристроях: трансформаторах, кабелях, лініях електропередач, конденсаторах, вимикачах, розрядниках і т.д.

Рідкі діелектрики можна класифікувати за їхньою природою на наступні групи:

- 1) вуглеводні мінеральні – продукти перегону нафти й кам'яного вугілля (трансформаторне, конденсаторне та ін. масла);
- 2) вуглеводні рослинні (касторове, лляне та 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. 1.4.

Вид діелектрика	ρ , Ом·см	ϵ	$\text{tg}\delta$
Неполярні	$\geq 10^{18}$	1,8...2...2,5	$\approx 0,001$
Слабополярні	$\approx 10^{11} \dots 10^{12}$	$> 2,5$	$\approx 0,01$
Сильнополярні	$\approx 10^7 \dots 10^8$	> 5	$\approx 0,1$

У промисловості мають справу з технічно чистими рідкими діелектриками, в яких вплив сторонніх домішок обмежено деякою мінімальною концентрацією. Тому 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 використаного рідкого діелектрика.

Порівняно 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 при змінній напрузі.

На пробій рідких діелектриків істотно впливає безліч факторів, які можуть як знижувати пробивну напругу (забруднення, зволоження та ін.), так і збільшувати її

(очищення, тиск, бар'єри тощо). Основні фактори, що змінюють $U_{\text{ПР}}$:

1) забруднення й зволоження (збільшення бруду в маслі 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 $U_{\text{ПР}}=f(T_0)$ має 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 різко неоднорідному 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 більший, ніж для газових діелектриків);

7) форма, площа електродів і відстань між ними (форма електродів створює поля різного ступеня неоднорідності при $S = const$, чим більший 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 більші, ніж при позитивній; цей ефект тим більший, чим більш полярний діелектрик).

Пробій рідких діелектриків – явище складне, що пояснюється складними сполуками рідких діелектриків і багатьма факторами, що впливають на розвиток пробою (забруднення, форма, розміри й матеріал електродів, температура, тиск та ін.) Для добре очищених рідин величина електричної міцності досягає 1000 кВ/см.

1.15.1. Вплив води й мікродомішок

Волога в маслі може перебувати в трьох станах: у молекулярно – молекулярно-розчиненому вигляді, у вигляді емульсії (дрібні кульки води розміром 2...10...10 мкм) і у вигляді водяного відстою на дні бака. Розчинність води в

рідких діелектриках залежить від температури. Наприклад, у мінеральному маслі при 20 °С може розчинитися $\sim 40 \times 10^{-6}$ води по об'єму, а при 80 °С $\sim 400 \times 10^{-6}$.

Наявність вологи в обох станах позначається на електричній міцності масла, особливо в присутності волокон. Причому сильніше 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 витягуються уздовж силових ліній поля. Це приводить до утворення «містків», які збільшують локальну щільність струму, нагрівання, значного збільшення 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. 1.20) (мільйонні частки вологи в одиниці об'єму масла) показують, що наявність 40–50 млн. частинок вологи зменшує електричну міцність масла приблизно в 10 разів.

Зниження електричної міцності в області малих концентрацій викликане впливом розчиненої вологи, а в області великих концентрацій – емульгованої вологи. Наявність вологи й волокон слабо позначається на міцності рідких діелектриків при коротких імпульсах напруги (одиниці – десятки мікросекунд), оскільки частинки 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% волога випадає у вигляді осаду на дно. Хоча сам осад 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, значно полегшуючи утворення

провідних містків. Ці забруднення проникають у масло в процесі експлуатації з елементів твердої ізоляції, що перебувають у маслі.

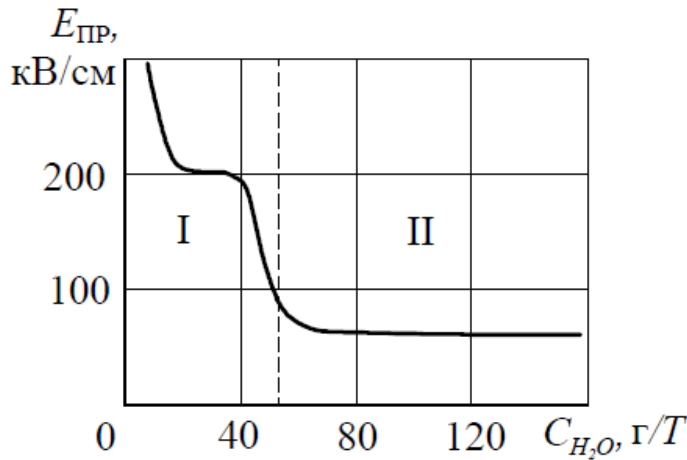


Рис. 1.20.
Залежність електричної міцності трансформаторного масла від вмісту води, C_{H_2O} (грам на тонну): I – зона розчинності води, II – емульгована вода

1.15.2. Вплив тиску

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

Розглянемо залежності пробивної напруги трансформаторного масла від тиску нижче атмосферного (рис. 1.21). При знижених тисках із масла починають виділятися розчинені в ньому газу, і його міцність різко падає (рис. 1.21, крива 1).

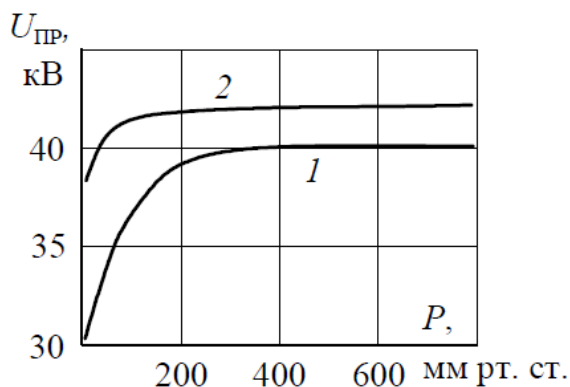


Рис. 1.21. Залежність пробивної напруги трансформаторного масла від тиску: 1 – недегазоване масло; 2 – дегазоване масло

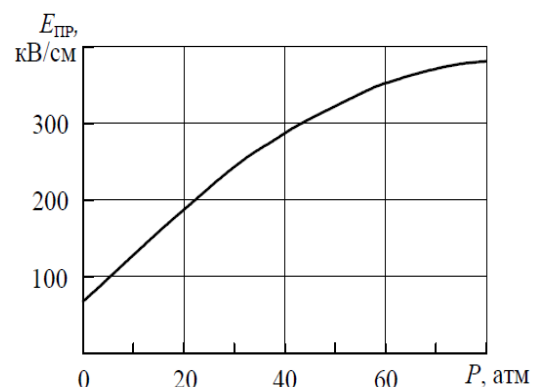


Рис. 1.22. Залежність пробивної напруги парафінового масла від тиску (50 Гц)

1.15.3. Вплив температури

Електрична міцність рідких діелектриків суттєво залежить від їх чистоти. Для чистих сухих рідин значний вплив температури спостерігається в області інтенсивного випаровування і кипіння. (рис. 1.23, крива 1).

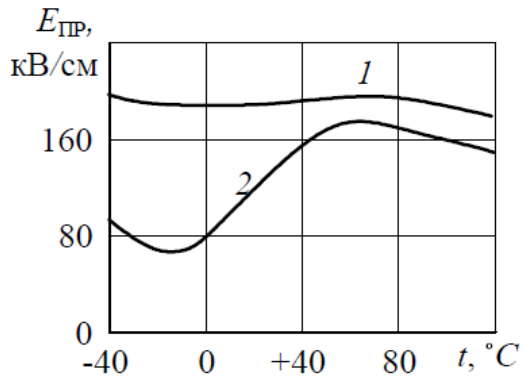


Рис. 1.23. Залежність електричної міцності трансформаторного масла від температури: 1 – сухе масло; 2 – технічне масло з домішкою вологи

Для технічно чистих рідин з домішкою вологи залежність електричної міцності від температури досить складна. Має місце мінімум і максимум електричної міцності (рис. 1.23, крива 2). Зниження температури від точки максимуму приводить до зменшення $E_{ПР}$ до мінімуму, що пов'язане з переходом розчиненої вологи в емульгований стан. Подальше зниження температури (менше 0° C) викликає замерзання крапельок води і, як наслідок, підвищення $E_{ПР}$. У льоду діелектрична постійна ϵ_L приблизно дорівнює діелектричній постійній масла ϵ_M ($\epsilon_L \approx \epsilon_M$), що зменшує вплив вологи на електричну міцність масла. Зменшення електричної міцності для сухого й технічного мастил при температурі вище +80 °C (рис. 1.23) зумовлено інтенсивним випаровуванням і кипінням рідини.

1.15.4. Вплив часу прикладання напруги

Електрична міцність рідких діелектриків істотно залежить від тривалості впливу напруги τ : чим більше домішок у рідині (особливо вологи й волокон), тим сильніша ця залежність (рис. 1.24).

Експериментальні результати щодо пробою рідких діелектриків показують наявність, як мінімум, двох областей, пов'язаних із часом впливу напруги (рис. 1.24), поява яких пояснюється різними механізмами пробою. При впливі імпульсів напруги із тривалістю $\tau < 10^{-4}$ с (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.

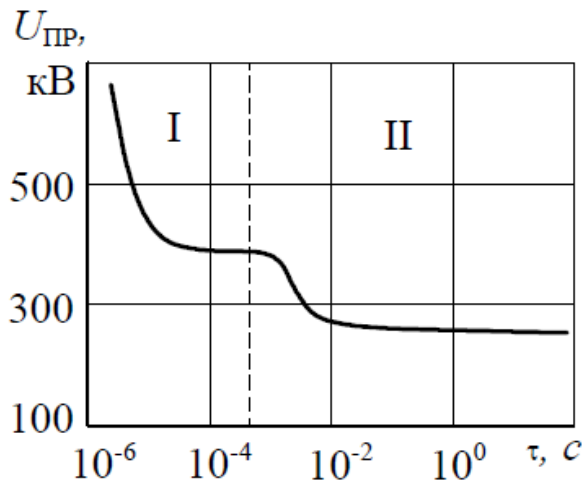


Рис. 1.24. Залежність пробивної напруги від часу впливу для трансформаторного масла. Електроди: вістря-площина; відстань між електродами 20 см; позитивна полярність напруги

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 скипання рідини під впливом виділеної енергії в локальних зонах електрода ("теплова" теорія пробою). У газових пухирцях розвивається ударна іонізація, утворюється кистьовий стримерний канал, що розвивається до протилежного електрода. Різка збільшення електричної міцності при $\tau < 10^{-5}$ пов'язане із запізненням розвитку розряду, коли час впливу напруги стає співмірним із часом формування розряду. Збільшення часу впливу напруги $\tau > 10^{-3}$ 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 $U_{пр}$ мають теплові процеси.

При тривалому впливі напруги (область II) присутність вологи, газу, забруднень у рідкому діелектрику сильно знижує його електричну міцність, причому найнебезпечнішим є емульгований стан вологи. Пробій настає внаслідок

утворення ланцюжків із дрібних поляризованих включень, які витягуються вздовж силових ліній. Ці ланцюжки утворюють провідні канали, по яких протікає струм, що розігріває воду й прилягаючу до каналу рідину до кипіння. Пробій рідини відбувається по газовому каналу, що утворився.

1.15.5. Вплив матеріалу, геометрії електродів, відстані між ними й полярності

Геометрична форма електродів створює поля різного ступеня неоднорідності, і чим більший коефіцієнт неоднорідності, тим нижча пробивна напруга. Навіть незначне збільшення радіуса кривизни електродів у різко неоднорідних полях істотно збільшує $U_{\text{ПР}}$ порівняно з повітрям. Збільшення відстані між електродами S приводить до збільшення пробивної напруги (рис. 1.25).

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 $U_{\text{ПР}}$. Стан поверхні електродів також впливає на електричну міцність $E_{\text{ПР}}$ рідких діелектриків. Забруднення, окиснення й погане полірування поверхні електродів знижують $E_{\text{ПР}}$. 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 із катода.

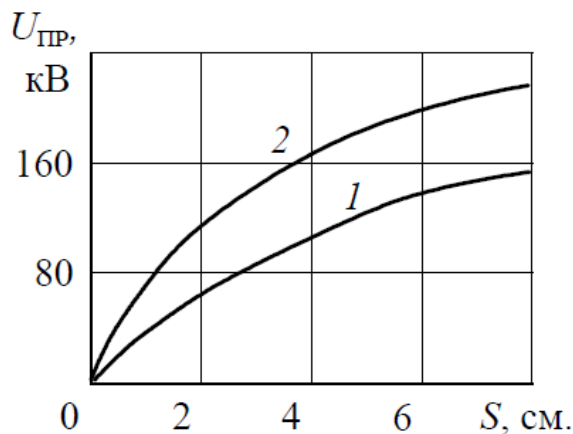


Рис. 1.25. Залежність пробивної напруги від відстані між електродами і полярності для трансформаторного масла, електроди вістря-площина: 1 – позитивна полярність вістря; 2 – негативна полярність вістря; напруга постійна

Як бачимо (рис. 1.25), пробивна напруга залежить від полярності електрода-вістря при несиметричній системі електродів. Найбільш яскраво ця залежність проявляється для полярних рідин. Наприклад, для води збільшення $U_{\text{пр}}$ при негативній полярності вістря досягає 2,0-2,5 рази порівняно з позитивною полярністю.

1.15.6. Бар'єрний ефект

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

При наявності бар'єрів електрична міцність розрядного проміжку значно зростає. Це зумовлено 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 ускладнює утворення суцільних провідних містків із волокнистих речовин, що перебувають у маслі. Дія бар'єрів більш ефективна в нерівномірних полях. При короткочасних імпульсних впливах напруги бар'єри менш ефективні, ніж при постійній і змінній напругах.

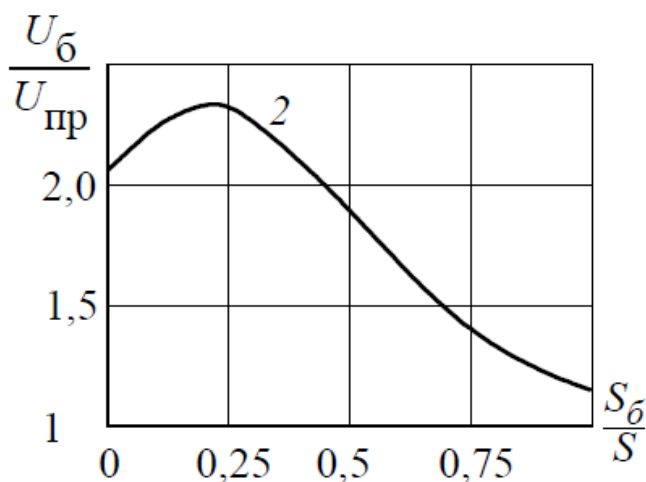


Рис. 1.26. Вплив бар'єра на пробивну напругу масляного проміжку: електроди вістря-площина; частота 50 Гц, $S - 75$ мм

На рис. 1.26 зображена відносна зміна пробивної напруги $U_6 / U_{\text{пр}}$ ($U_{\text{пр}}$ – пробивна напруга чисто масляного проміжку, а U_6 – пробивна напруга того ж проміжку з бар'єром) залежно від положення бар'єра S_6 / S (S – відстань між електродами, а S_6 – відстань від вістря до бар'єра) у масляному проміжку, утвореному електродами вістря-площина при впливі змінної напруги із частотою 50 Гц.

Бар'єр – плоский електрокартон товщиною 5 мм. Відстань до бар'єра відміряється 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 $S_6 \approx 0,25 S$, що добре корелює з аналогічним ефектом для газу.

Маслобар'єрна ізоляція широко застосовується у високовольтній техніці при виготовленні трансформаторів, введів, реакторів і та. ін.

1.16. Пробій твердої ізоляції

Електрична міцність твердої ізоляції вище, ніж газоподібної та рідкої $U_{\text{пр тв}} > U_{\text{пр р}} > U_{\text{пр г}}$.

Електрична міцність твердої ізоляції залежить від:

- 1) 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 – $E \sim 10^2 - 10^3$ кВ/мм;
- 2) тепловий – $E \sim 10 - 10^2$ кВ/мм;
- 3) старіння – $E \sim 10$ кВ/мм і менше.

Тверда ізоляція містить у собі всі види твердих діелектриків – від плівок до товстої монолітної. У табл. 1.5 наведені деякі характеристики твердої ізоляції, які можуть бути потрібні в процесі її експлуатації.

Найбільш сильний вплив на електричну міцність твердої ізоляції мають час впливу напруги, температура, товщина.

Залежність пробивної напруги від часу впливу напруги називається вольт-часовою характеристикою (рис. 1.27).

Таблиця 1.5.

Ел. характеристики	Мех. характеристики	Теплові характеристики	Хім. характеристики	Інші
$U_{пр}$ $U_{пер}$ $U_{роб}$ $U_{сухо\ розр}$ ρ_V, ρ_S $tg \delta$ $t = f(E, f)$	$\sigma_{роз}$ $\sigma_{ст}$ $\sigma_{зг}$ Твердість Гнучкість Еластичність	$T_{кип}$ $T_{плавл}$ $T_{заст}$ Теплопровідність Теплоємність Теплове розширення	Стабільність Розчинність Дія на ін. діелектр.	Питома вага Абсорбція вологи Дія опромінення, мікроорганізмів та ін.

На кривій виділяють 4 області. Області I і II відповідають електричному пробою. Час прикладення напруги $t < 0,1$ с. Різке зростання пробивної напруги в I області зумовлено запізненням розвитку розряду щодо часу впливу напруги. Область III характеризується різким спадом пробивної напруги, що говорить про переважання ролі теплових процесів. Область IV – повільне зниження пробивної напруги зі збільшенням часу впливу пов'язане з повільними процесами старіння, деградації твердої ізоляції.

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, вводів та ін. Вплив температури наочно ілюструється рис. 1.28, де наведена залежність електричної міцності порцеляни від температури. Видно, що до температури $\sim +75$ °C пробивна напруженість порцеляни $E_{пр}$ практично не змінюється (область А). Подальше збільшення температури приводить до різкого зменшення $E_{пр}$ (область Б).

Розвиток теплового пробою у твердому діелектрику в загальних рисах може бути відображений у вигляді наступної послідовності:

$$U_d \rightarrow I_d \rightarrow T_d \uparrow \rightarrow \gamma \uparrow \text{ і } tg \delta \uparrow \rightarrow I_d \uparrow \rightarrow T_d \uparrow \text{ і т.д.,}$$

де U_d – напруга, прикладена до ізоляції; I_d – струм, що тече через ізоляцію; T_d – температура ізоляції; γ – провідність ізоляції; $\operatorname{tg} \delta$ – діелектричні втрати в ізоляції.

Суть теплового пробою ізоляції можна зобразити у вигляді рис. 1.29, де Q_1 – тепло, виділене в ізоляції за рахунок джоулевих і діелектричних втрат; Q_2 – тепло, що відводиться від ізоляції у навколишнє середовище.

Тепло, яке виділилось, визначається як

$$Q_1 = \omega C \operatorname{tg} \delta U_2, \quad (1.50)$$

а відведене тепло як

$$Q_2 = k S (T - T_0), \quad (1.51)$$

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 в середині діелектрика.

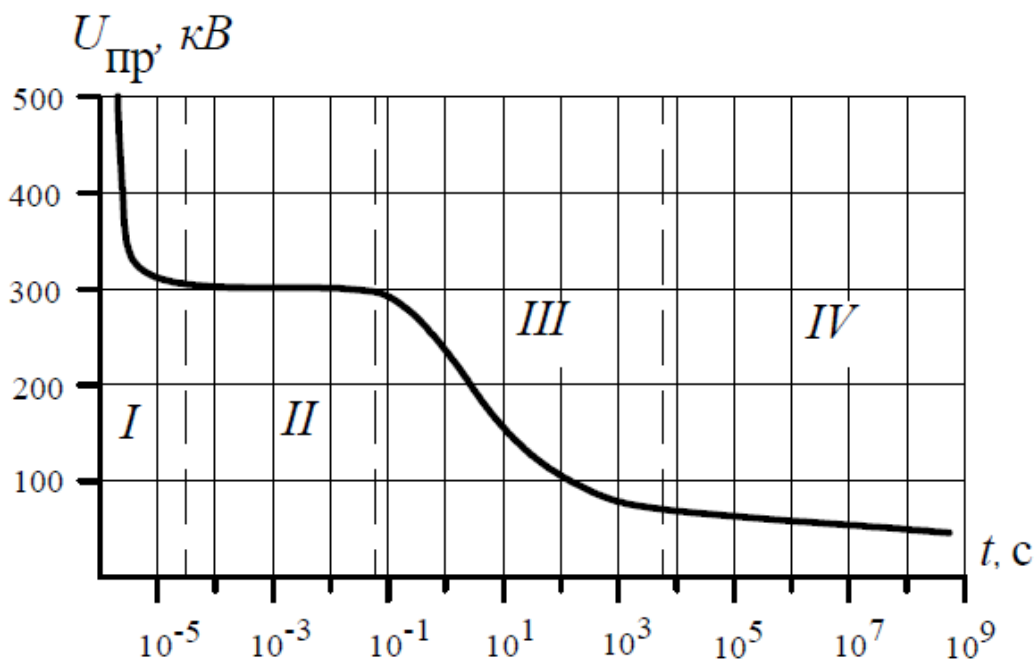


Рис. 1.27. Вольт-часова характеристика твердої ізоляції: I – електричний пробій, запізнення розвитку каналу розряду; II – електричний пробій, $t < 0,1$ с, не залежить від температури; III – тепловий пробій, $t > 0,1$ з, різке зниження $U_{пр}$ у часі; IV – старіння, $U_{пр}$ мало змінюється, а час до пробою значно зростає

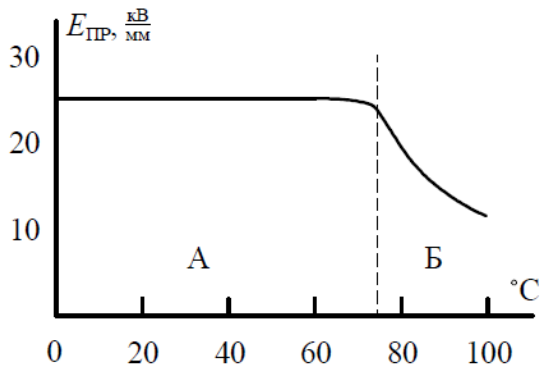


Рис. 1.28. Залежність пробивної напруги від температури для порцеляни (частота напруги 50 Гц)

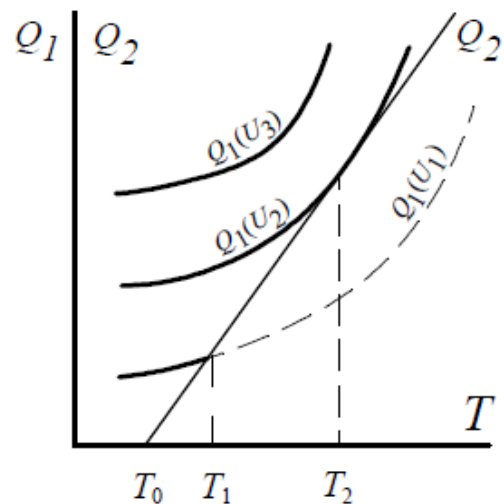


Рис. 1.29. Зміна виділеного Q_1 і відведеного Q_2 тепла в ізоляції при різних U

Зміна прикладеної напруги до ізоляції приводить до зміни втрат у ній. На рис. 1.29 $Q_1(U_1)$, $Q_1(U_2)$, $Q_1(U_3)$ – тепло, виділене при $U_1 < U_2 < U_3$, а Q_2 – тепло, відведене від ізоляції.

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

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

Для U_3 – завжди тепловий пробій.

T_2 – точка теплової рівноваги. Робоча температура $T_{\text{раб}} < T_2$.

1.16.1. Часткові розряди

Під дією високої напруженості електричного поля в ізоляції в місцях зі зниженою електричною міцністю виникають часткові розряди (ЧР), які являють собою пробій газових включень, локальні пробіи малих об'ємів твердого діелектрика. Умови виникнення ЧР визначаються конфігурацією електричного поля ізоляційної конструкції та електричних характеристик розглянутої області ізоляції.

ЧР звичайно не приводять до наскрізного пробою діелектрика, однак приводять до місцевого руйнування ізоляції, а при тривалому існуванні можуть привести й до наскрізного пробою. Виникнення ЧР завжди свідчить про локальну неоднорідність діелектрика. У зв'язку із цим реєстрація характеристик ЧР дозволяє оцінювати якість виготовлення ізоляції й виявляти місцеві дефекти. Характеристики ЧР досить

добре корелюють із розмірами й кількістю дефектів, тобто дозволяють судити про ступінь дефектності ізоляційної конструкції. Вивчення характеристик ЧР залежно від різних умов роботи стало важливим питанням для кабелів, конденсаторів, трансформаторів та інших пристроїв – там, де застосовується шарувата ізоляція при змінних, постійних, пульсуючих і імпульсних напругах.

Розглядаючи механізм виникнення ЧР, скористаємося еквівалентною схемою заміщення діелектрика із загальною ємністю C_e (рис. 1.30).

$$C_e = C_0 + \frac{C_B C_D}{C_B + C_D} \quad (1.52)$$

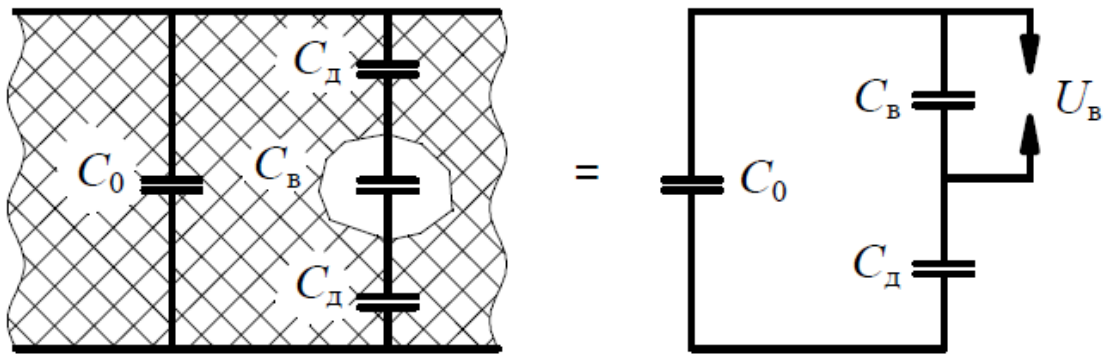


Рис 1.30. Схема заміщення твердого діелектрика: C_0 – ємність бездефектної ізоляції; C_e – ємність повітряного включення; C_D – ємність діелектрика послідовно із включенням; U_B – напруга пробою повітряного включення

ЧР виникають тоді, коли напруга на включенні досягає пробивного значення $U_{ПР}$ – напруги запалювання розряду у включенні. Напруженість електричного поля у включенні E_B пов'язана з напруженістю в іншій частині діелектрика так:

$$E_B = E_D \cdot \frac{\epsilon_D}{\epsilon_B}, \quad (1.53)$$

де E_D – напруженість електричного поля в діелектрику;
 ϵ_D – відносна діелектрична проникність діелектрика;
 ϵ_B – відносна діелектрична проникність включення.

Виходячи з (1.53), напруженість електричного поля в газовому включенні (і в будь-якому іншому, де $\epsilon_v < \epsilon_d$) завжди вище, ніж в іншому діелектрику. Епюри напруги на включенні в процесі прикладання змінної напруги наведені на рис. 1.31.

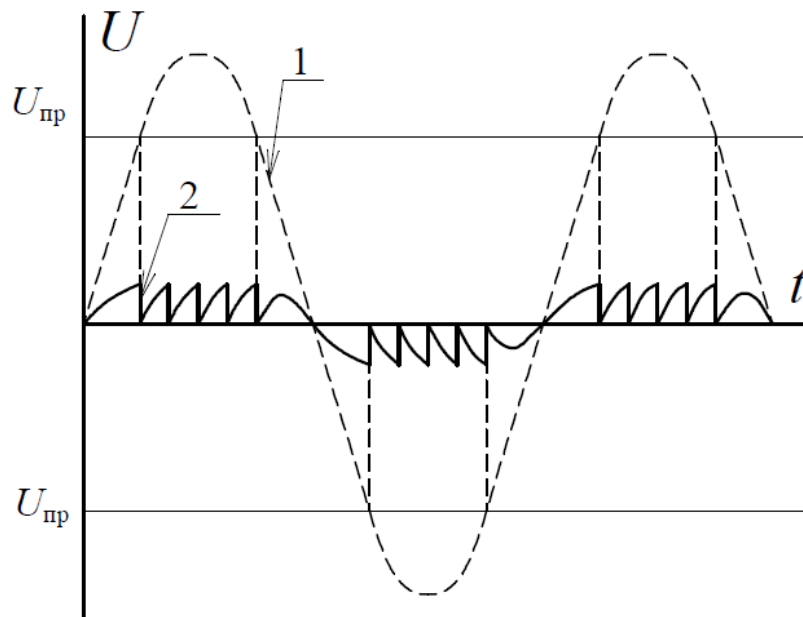


Рис. 1.31. Епюри напруги на повітряному включенні у твердому діелектрику: 1 – напруга на зразку; 2 – напруга на включенні; $U_{пр}$ – напруга на зразку, при якому відбувається пробій повітряного включення

При розмірах включення десятки мікрометрів і тиску близькому до атмосферного, пробивна напруга лежить поблизу мінімуму кривої Пашена, слабо змінюється зі зміною розмірів включення й становить 250...300 В. Найбільш небезпечні ЧР на змінній або імпульсній напрузі.

Руйнуюча дія ЧР на діелектрики зумовлена наступними факторами, що виникають при пробіі включення:

- 1 – вплив ударних хвиль;
- 2 – тепловий вплив;
- 3 – бомбардування зарядженими частинками;
- 4 – вплив хімічно активних продуктів розряду;
- 5 – вплив випромінювання;
- 6 – розвиток дендритів.

Залежно від величини заряду $q_{\text{чр}}$, вимірюваного при ЧР, можлива класифікація ЧР за $q_{\text{чр}}$:

1. При перевищенні деякого порога напруги в ізоляції виникають ЧР із інтенсивністю $q_{\text{чр}} = 10^{-12} \dots 10^{-11}$ Кл. Такі ЧР не викликають швидкого руйнування ізоляції і в багатьох випадках припустимі. Такі розряди називаються початковими.

2. Подальше зростання напруги або збільшення розмірів включень у процесі тривалої роботи ізоляції приводить до різкого зростання інтенсивності ЧР, причому насамперед зростає $q_{\text{чр}}$ до величини $q_{\text{чр}} = 10^{-10} \dots 10^{-8}$ Кл. Їхнє виникнення різко скорочує термін служби ізоляції й вони не повинні допускатися при робочих умовах. Такі розряди називаються критичними.

На постійній нарузі інтервал між ЧР у включенні становить секунди – десятки секунд, що на кілька порядків більше, ніж при змінній нарузі промислової частоти. Це дозволяє збільшити значення напруженості електроізоляційних конструкцій постійної напруги порівняно зі змінним.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ:

1. Дайте визначення коефіцієнта неоднорідності електричного поля.
2. Які електричні поля відносяться до однорідних?
3. Які електричні поля відносяться до слабонеоднорідних?
4. Які електричні поля відносяться до різконеоднорідних?
5. Поясніть відмінність між іонізацією та збудженням атома.
6. Наведіть приклади та поясніть суть поверхневої іонізації.
7. Наведіть приклади та поясніть суть об'ємної іонізації.
8. Поясніть причини виникнення та розвиток лавини електронів.
9. Наведіть умови самостійності розряду.
10. Поясніть процес виникнення та розвитку стримера.
11. Сформулюйте та поясніть закон Пашена.
12. Наведіть графічне відображення закону Пашена та поясніть хід залежності $U_{\text{пр}} = f(PS)$.
13. Поясніть вплив неоднорідності електричного поля на розрядну напругу.
14. Поясніть вплив полярності електродів на розрядну напругу.

15. Поясніть вплив розміщення бар'єра у розрядному проміжку на розрядну напругу.
16. Поясніть вплив часу прикладення напруги на електричну міцність газової ізоляції (вольт-секундну характеристику – ВСХ).
17. Поясніть явище коронного розряду та причини його виникнення.
18. Наведіть розрахунки втрати енергії при коронуванні.
19. Поясніть процес розвитку розряду по поверхні ізолятора.
20. Поясніть процес розвиток розряду вздовж провідної і забрудненої поверхні ізолятора.
21. Поясніть вплив вологи і домішок на пробій рідких діелектриків.
22. Поясніть вплив тиску на розряд в рідких діелектриках.
23. Поясніть вплив температури на пробій рідких діелектриків.
24. Поясніть вплив часу дії напруги на розряд в рідких діелектриках.
25. Поясніть вплив матеріалу, геометрії електродів, віддалі між ними і полярності на пробій рідких діелектриків.
26. Поясніть бар'єрний ефект при розряді в рідких діелектриках.
27. Поясніть процес виникнення та розвитку пробою твердої ізоляції .
28. Поясніть часткові розряди в діелектриках.

РОЗДІЛ II. ВИСОКОВОЛЬТНА ІЗОЛЯЦІЯ

Високовольтна ізоляція поділяється на внутрішню й зовнішню. Зовнішня перебуває в контакті з атмосферою, внутрішня - усередині герметичного об'єму. Розрізняють також ізоляцію для зовнішнього й внутрішнього встановлення (зовнішня - поза приміщеннями, внутрішня - відділена від зовнішніх впливів).

Розрізняють короткочасну пробивну напругу $U_{\text{пр}}$ і тривалу $U_{\text{роб}}$. На ізоляцію впливають грозові й комутаційні імпульси, випробовувальні напруги, а $U_{\text{роб}}$ повинна впливати тривалий час (20-30 років) без пробоїв.

При тривалому впливі $U_{\text{роб}}$ відбувається старіння ізоляції.

Причини старіння:

- 1) електричні - часткові розряди, трекінг, зміна γ , $\text{tg } \delta$;
- 2) теплові - прискорення хімічних реакцій, збільшення $\text{tg } \delta$, зменшення ρ ;
- 3) механічні - тріщини, втома, руйнування;
- 4) хімічні - окиснення, утворення радикалів і т.п.;
- 5) зовнішнє середовище - волога, ультрафіолетові промені, температура.

2.1. Високовольтні ізолятори

За призначенням ізолятори поділяються на лінійні й станційно-апаратні, які, у свою чергу, поділяються на опорні й прохідні.

2.1.1. Лінійні ізолятори

Лінійні ізолятори застосовуються для кріплення й ізолювання проводів і тросів повітряних ліній електропередачі. За конструктивним виконанням вони поділяються на штирові й підвісні.

Штирові ізолятори виготовляються з електротехнічної порцеляни (фарфору) або скла й монтуються на опорах за допомогою штирів або гаків. Випускаються різного конструктивного виконання.

Позначення, наприклад, ШФ10В: штировий, фарфоровий, номінальна напруга 10 кВ, конструктивне виконання В (усього

існує три варіанти конструктивного виконання - А, Б, В). Випускаються промисловістю на напругу до 35 кВ.

Підвісні ізолятори застосовуються для напруг більше 35 кВ. Поділяються на тарілчасті (шарнірні) і стрижневі. Виготовляються з електротехнічної порцеляни, скла й полімерних матеріалів. На рис. 2.1 наведена конструкція підвісного тарілчастого ізолятора.

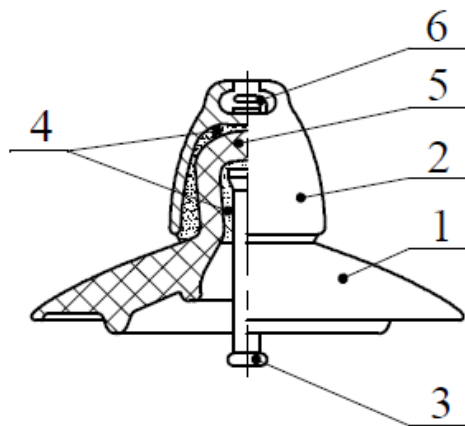


Рис. 2.1. Підвісний шарнірний ізолятор з конусною голівкою: 1 – тарілка ізолятора; 2 – чавунна шапка; 3 – сталевий стрижень; 4 – цементна замазка; 5 – голівка ізолятора; 6 – замок

Шапка 2 і стрижень 3 забезпечують шарнірне сполучення одного ізолятора з іншим при зборці в гірлянду ізоляторів. Завдяки конструктивному виконанню голівка 5 ізолятора працює на стиск і тому витримує дуже великі механічні навантаження (до 30-50 Тс). Позначення ізолятора, наприклад, ПСГ6-А: підвісний, скляний, брудостійкий. Мінімальне руйнівне навантаження 6 тонн-сил.

Підвісні стрижневі ізолятори виготовляються з електротехнічної порцеляни, скла, ситалу, скловолокна з полімерним покриттям. Один ізолятор може замінити гірлянду з 7 тарілчастих ізоляторів на напругу 110 кВ. Шарнірно кріпиться за допомогою двох шапок із замками на кінцях ізолятора. Перевагою стрижневих ізоляторів є непробивність, крім того, за рахунок малого діаметра ізолятора підвищуються градієнти електричного поля по поверхневому перекриттю. Позначення ізолятора, наприклад, СФ-110/2,25: стрижневий, фарфоровий, номінальна напруга 110 кВ, мінімальне руйнівне навантаження 2,25 тонна-сила.

2.1.2. Станціонно – апаратні ізолятори

Опорні ізолятори призначені для кріплення шинопроводів, деталей апаратів і ізолювання їх від заземлених конструкцій та між собою. Виготовляють для зовнішнього й внутрішнього встановлення на напругу до 110 кВ. На більшу напругу опорні ізолятори збирають у колони.

Опорні ізолятори для зовнішнього встановлення поділяються на штирові й стрижневі. Штирові ізолятори використовуються в тих випадках, коли потрібна більша механічна міцність на вигин. Виготовляються з електротехнічної порцеляни. Позначення, наприклад, ОНШ-35-2000: опорний, зовнішнього встановлення, штировий, номінальна напруга 35 кВ, мінімальне руйнівне навантаження 2000 кг-сил.

Опорно-стрижневі ізолятори виготовляються на напругу 35-150 кВ із електротехнічної порцеляни. Кінці ізолятора армовані чавунними фланцями. Позначення, наприклад, ОНС-110-1000 - опорний, зовнішнього встановлення, стрижневий, номінальна напруга 110 кВ, мінімальна механічна міцність 1000 кг-сил.

Прохідні ізолятори й вводи використовуються там, де струмоведучі частини проходять через стіни, перекриття будинків, огороження електроустановок або вводяться всередину металевих корпусів устаткування. Прохідними ізоляторами називають ізолятори на напругу до 35 кВ, на напругу 110 кВ і вище - вводи. Вводи мають більш складну конструкцію ізоляції й виконуються з маслобар'єрною ізоляцією (до 150 кВ) або з паперово-масляною ізоляцією (220 кВ і вище).

Прохідні ізолятори на високі напруги до 35 кВ включно виготовляються з електротехнічної порцеляни, скла, бакелітового паперу. На рис. 2.2 наведена конструктивна схема прохідного ізолятора.

Для збільшення напруги перекриття $U_{\text{пер}}$ на зовнішній поверхні ізолятора роблять ребра, а також збільшують діаметр ізолятора біля заземленого фланця. Прохідні ізолятори маркуються по напрузі, струму й згинаючому механічному навантаженню. Наприклад, П-10/400 - 750, що означає: прохідний ізолятор, $U_{\text{Н}} = 10$ кВ, $I_{\text{Н}} = 400$ А, $P_{\text{зг}} = 750$ кГс.

Вводи – це прохідні ізолятори на 110 кВ і вище. Вони містять зовнішню й внутрішню ізоляцію складної конструкції. Зовнішньою ізоляцією є порцелянова покришка. Внутрішня – ділянка ізоляції в тілі вводу. Вводи бувають двох типів – маслобар’єрні й паперово-масляні (для $U_H \geq 220$ кВ).

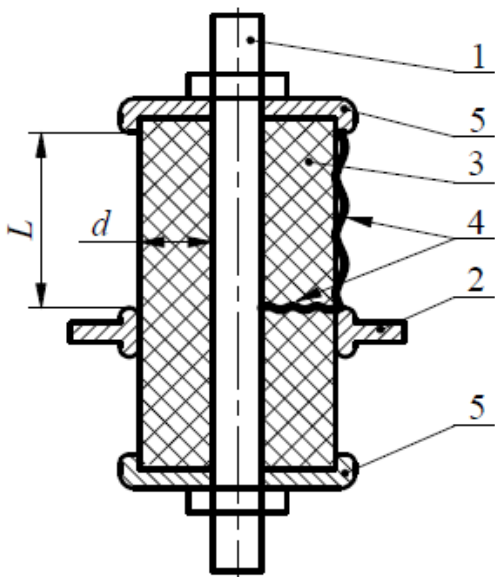


Рис. 2.2. Конструктивна схема прохідного ізолятора: 1 – струмоведучий стрижень (труба); 2 – заземлений фланець; 3 -- тверда ізоляція; 4 – шляхи пробою ($U_{пр} > U_{пер}$); 5 – високовольтні фланці

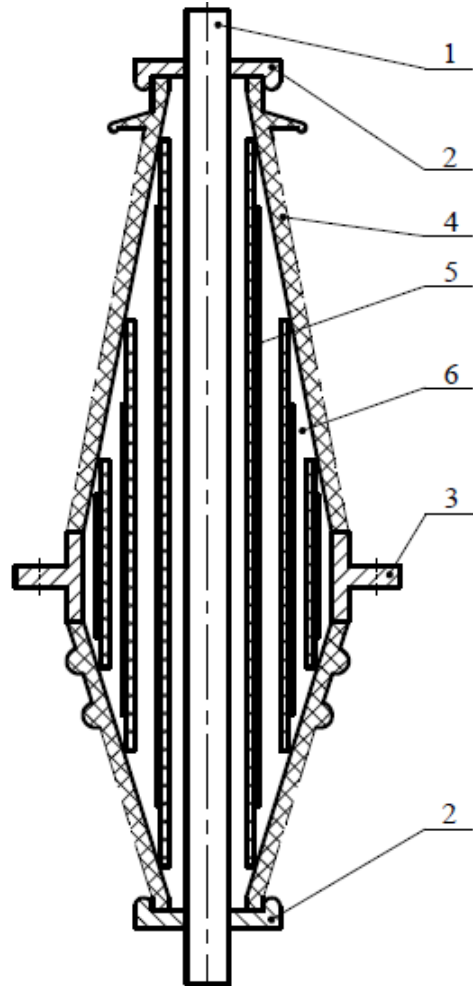


Рис. 2.3. Конструктивна схема маслобар’єрного вводу: 1 – струмо-провід (стрижень), 2 – високовольтний фланець, 3 – заземлений фланець, 4 - порцелянова сорочка, 5 – бар’єри з обкладками, 6 – масло

1) Маслобар’єрний ввід 110-150 кВ конденсаторного типу (рис 2.3). Щоб підвищити $U_{пр}$: а) розбивають проміжок на n малих проміжків бар’єрами 5; б) вирівнюють поле металевими

обкладками (фольга на бар'єрах). У результаті $U_{пр}$ підвищується у $\sim 2,5$ рази. Обкладки вирівнюють поле в радіальному й аксіальному напрямках. Найважливіше вирівняти поле в аксіальному напрямку для зменшення довжини вводу, для цього уступи роблять однаковими.

На рис. 2.4 наведені епюри розподілу напруженості електричного поля в радіальному (а) і аксіальному (б) напрямках маслобар'єрного вводу.

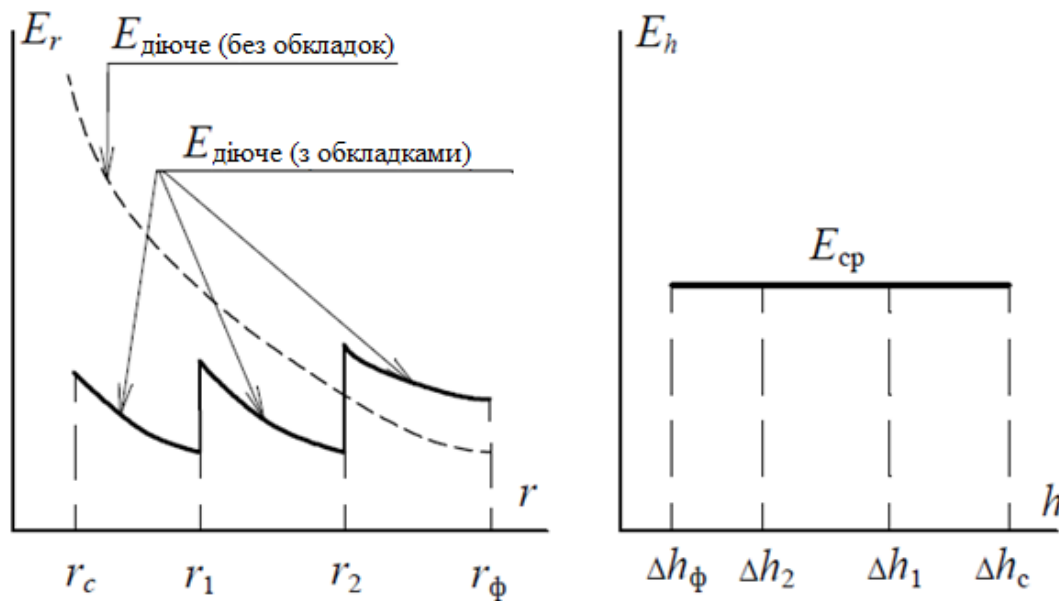


Рис. 2.4. Розподіл напруженості електричного поля в радіальному (а) і аксіальному (б) напрямках вводу: r_c – радіус струмопроводу (стрижня); r_1 – радіус першої обкладки (фольги); r_2 – радіус другої обкладки (фольги); r_ϕ – радіус обкладки біля фланця (заземлено); Δh_c – довжина виступу ізоляції біля стрижня; Δh_1 – довжина виступу на першому бар'єрі; Δh_2 – довжина виступу на другому бар'єрі; Δh_ϕ – довжина виступу на бар'єрі біля фланця

Струмоведучий стрижень обмотується декількома шарами паперу. Основну електричну міцність ізоляції вводу забезпечує масло, що перебуває всередині покривки.

2) Паперово-масляні вводи конденсаторного типу на клас напруги $U \geq 220$ кВ. Вводи виготовляються шляхом намотування на струмоведучий стрижень (або трубу) ізоляційного тіла з паперу. Через кожні 2-4 мм намотування паперу в тіло заставляються конденсаторні обкладки з

алюмінієвої фольги для вирівнювання поля в осьовому й радіальному напрямках. Після намотування тіло просочується маслом у вакуумі, а після збирання вводу герметизується.

2.2. Ізоляція високовольтних конденсаторів

Призначення конденсаторів:

- 1) поліпшення $\cos \varphi$;
- 2) ВЧ-зв'язок;
- 3) компенсація зсуву за фазою між струмом і напругою;
- 4) випрямляючі установки - фільтри та ін.;
- 5) високовольтні імпульсні установки.

Як ізоляція використовуються: газ, рідини, тверді неорганічні матеріали, тверді органічні матеріали. Тверда ізоляція у високовольтних конденсаторах частіше органічна – папір, плівки, просочені маслом. Конденсатор характеризується питомою енергією, Дж / дм³:

$$W_{\text{пит}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E_p^2}{2} \quad (2.1)$$

Високовольтні конденсатори різного призначення, різних номінальних напруг і реактивної потужності побудовані однаково: складаються з пакетів секцій, з'єднаних паралельно та (або) послідовно й розташованих у герметизованому корпусі, залитому просочувальною рідиною.

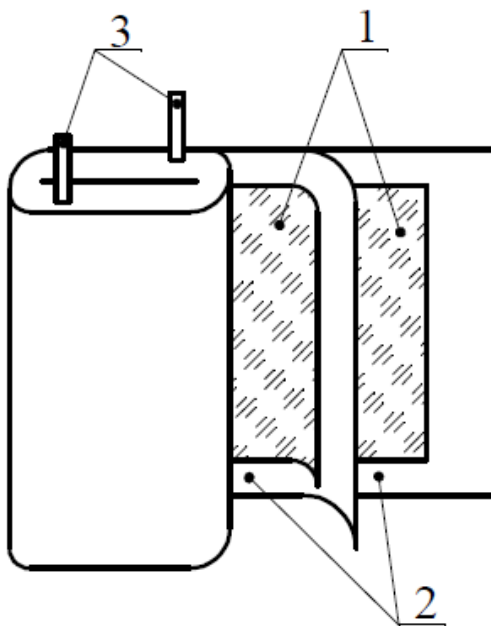


Рис. 2.5. Будова секції високовольтного конденсатора:
1 – фольга;
2 – діелектрик (шари паперу, плівки);
3 – виводи

Основним елементом будь-якого силового конденсатора є секція - спірально намотаний рулон зі стрічок діелектрика й алюмінієвих обкладок, що виконують роль електродів. Секції після намотування сплющують для зменшення об'єму.

2.3. Ізоляція трансформаторів

У силових трансформаторах ізоляція складається з різних за конструкцією елементів, що працюють у різних умовах. Повітряні проміжки між вводами і по їхній поверхні - зовнішня ізоляція.

Ізоляційні ділянки розташовані всередині бака трансформатора й усередині вводів – внутрішня ізоляція. Внутрішня ізоляція поділяється на головну й поздовжню. Головна ізоляція – між різними обмотками, стінками бака, магнітопроводом та ін. Поздовжня ізоляція – між елементами однієї й тієї ж обмотки: між витками, шарами, котушками.

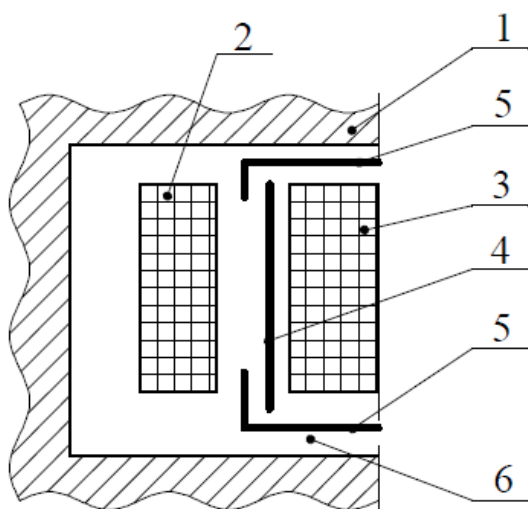


Рис. 2.6. Схема будови ізоляції високовольтного трансформатора:
1 – магнітопровід;
2 – низьковольтна обмотка (НВ);
3 – високовольтна обмотка (ВВ);
4 – бар'єр;
5 – щитки електроізоляції;
6 – масло.

У високовольтних силових трансформаторах як головна використовується маслобар'єрна ізоляція. Поздовжня ізоляція виконується паперово-масляною. Кількість бар'єрів залежить від номінальної напруги трансформатора.

Розглянемо схематичну будову головної ізоляції високовольтного трансформатора (рис. 2.6).

Високовольтні обмотки виконуються котушкового типу або безперервним циліндричним багат шаровим намотуванням.

Трансформатори до 35 кВ виконуються з ізольованою нейтраллю. Трансформатори понад 110 кВ – із заземленою нейтраллю.

2.4. Ізоляція кабелів

Основне призначення кабелів - передача електричної енергії від підстанції до споживачів.

Силові кабелі високої напруги виконуються трьох типів:

1) кабелі з паперовою ізоляцією й в'язким просоченням на напругу до 35 кВ (робоча напруженість $E_{\text{роб}}=2...3$ кВ/мм);

2) кабелі з паперовою ізоляцією просочені маслом під тиском – маслонаповнені кабелі: 2...3 атм – низький тиск ($E_{\text{роб}}=3...5$ кВ/мм); 4...5 атм – середній тиск ($E_{\text{роб}}=6...8$ кВ/мм); 8...15 атм – високий тиск ($E_{\text{роб}}=10...15$ кВ/мм);

3) кабелі з монолітною полімерною ізоляцією (поліетилен, фторопласт та ін.).

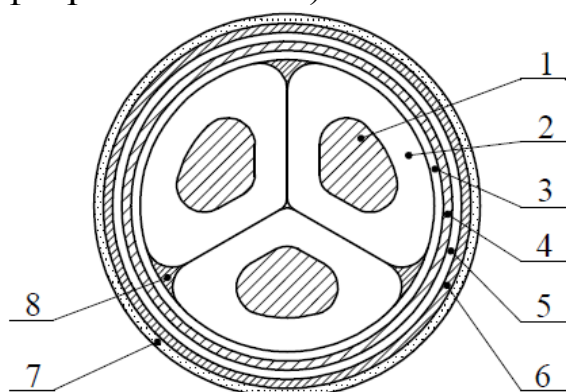


Рис. 2.7. Схема будови ізоляції кабелів до 35 кВ: 1 – жила; 2 – фазна ізоляція; 3 – поясна ізоляція; 4 – герметичне покриття; 5 – подушка; 6 – броня; 7 – антикорозійне покриття; 8 – наповнювач (джут).

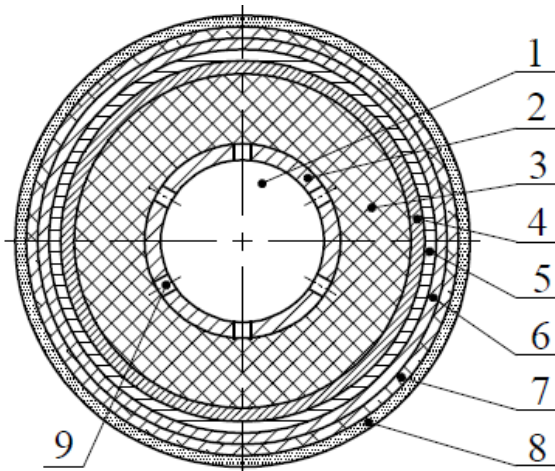


Рис. 2.8. Схема будови ізоляції кабелю 110 кВ: 1 – масляний канал; 2 – перфорована струмоведуча жила; 3 – паперово-масляна ізоляція; 4 – напівпровідний шар; 5 – герметичне покриття; 6 – подушка; 7 – броня; 8 – антикорозійне покриття; 9 – отвори для проходу масла в ізоляцію.

Крім цього знайшли застосування кабелі в трубах під тиском масла або газу. Розробляються криогенні кабелі з охолодженням до температури рідкого азоту (77 К) або рідкого гелію (4 К). Кабелі виконуються на напругу до 500 кВ. Розробляються кабелі на напругу 750-1150 кВ.

Розглянемо схему будови трифазного кабелю з поясною ізоляцією (рис. 2.7). Випускаються на робочу напругу до 10 кВ. На 35 кВ випускаються кабелі з окремо освинцьованими жилами й бронею зі сталевих стрічок типу АОСБ (А - алюмінієва жила, ОБ - окремо освинцьовані жили, СБ - броня сталевими стрічками).

Розглянемо схему будови маслонаповненого кабелю на робочу напругу 110 кВ (рис. 2.8). Як правило, виконуються однофазними у свинцевій оболонці із бронею із круглих або плоских дротів. Наприклад, типу МССК-110: М – маслонаповнений; С - середнього тиску; С - свинцевий екран; К - броня круглим сталевим дротом.

2.5. Ізоляція електричних машин

До обертових машин високої напруги належать турбо- і гідрогенератори, синхронні компенсатори й двигуни великої потужності з номінальною напругою 3 кВ і вище. Вони виконують важливі функції в енергосистемах і на промислових підприємствах. До їхньої ізоляції висуваються дуже високі вимоги.

Гідрогенератори розробляються й виготовляються на напругу до 220 кВ. Будова ізоляції обертової машини високої напруги визначається конструкцією її статорної обмотки. Ізоляція статорних обмоток поділяється на головну (корпусну) і поздовжню. Головна - ізоляція між провідниками обмотки й корпусом, а поздовжня - між витками однієї котушки й котушками в одному пазі.

Велике значення має регулювання електричного поля в ізоляції статорної обмотки. Основне завдання регулювання електричних полів - усунення часткових розрядів у повітряних зазорах між поверхнею ізоляції й стінками пазів і усунення ковзних розрядів по поверхні ізоляції в місцях виходу обмоток із пазу статора, де поле є різко неоднорідним. Для цього

використовуються напівпровідні покриття із залізистої азбестової стрічки і різні лаки. На рис. 2.9 наведена будова високовольтної ізоляції в пазу електричної машини.

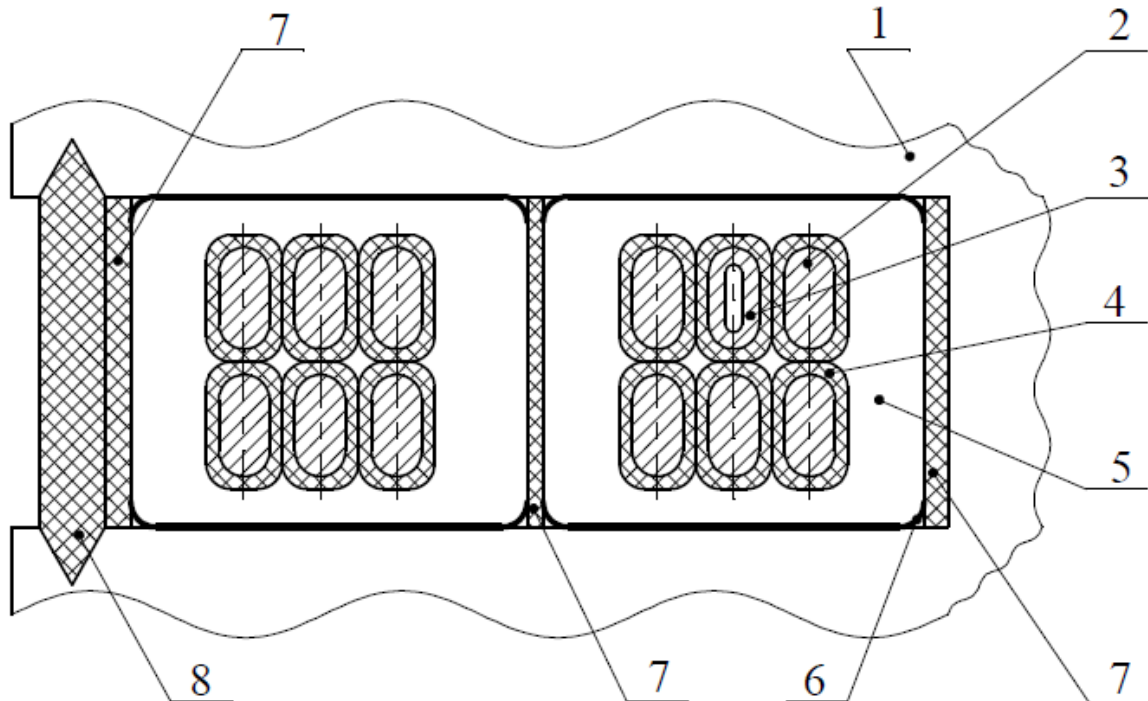


Рис. 2.9. Схема будови високовольтної ізоляції електричної машини: 1 – статор; 2 – провідник суцільний; 3 – провідник порожній; 4 – виткова (поздовжня) ізоляція; 5 – головна корпусна ізоляція; 6 – напівпровідне покриття; 7 – прокладки; 8 – клин.

Ізоляційні матеріали, які використовуються в електричних машинах, виготовляють на основі слюди (міканіт, мікастрічки, мікафорій), широко використовуються компаунди (термопластичні), як сполучні застосовують термореактивні лаки й смоли.

2.6. Профілактика ізоляції

2.6.1. Завдання й мета профілактики

Профілактика - система заходів, за допомогою яких забезпечується надійна робота ізоляції в процесі експлуатації.

Профілактика проводиться з метою виявлення дефектів, що виникають в ізоляції при експлуатації. Ослаблення електроізоляційних властивостей відбувається за рахунок:

- а) загального старіння;

б) появи місцевих дефектів.

Загальне старіння охоплює великий об'єм ізоляції.

Місцеві дефекти з'являються у вигляді зосереджених тріщин, повітряних включень, часткових зволожений.

У більшості випадків ці дефекти не можуть бути виявлені в результаті простого огляду ізоляції, тому для їхнього виявлення необхідна певна система профілактичних випробовувань.

Профілактичні випробовування ізоляції різко знижують ймовірність виникнення аварій в енергетичних системах через своєчасне виявлення дефектної ізоляції.

Для кожного виду ізоляції характерні певні види дефектів; вивчення їх фізичних особливостей і причин появи також є завданням профілактики ізоляції. Це дозволяє більш правильно організувати експлуатацію устаткування й розробляти найбільш ефективні методи профілактичних випробовувань.

Таким чином, завданням профілактики ізоляції є:

- 1) створення нормальних умов роботи ізоляції;
- 2) виявлення дефектів і їх усунення;
- 3) вивчення фізичних особливостей і причин появи дефектів;
- 4) розробка ефективних методів профілактики.

У табл. 2.1 наведені основні методи профілактичних випробовувань ізоляції і їхня коротка характеристика.

Таблиця 2.1

№ п/п	Метод випробовування ізоляції	Дефекти, що виявляють цим методом	Загальна характеристика методу
1	Вимірювання опору ізоляції	Наскрізні провідні шляхи або пробій	Один з основних методів
2	Вимірювання tgδ	Процеси іонізації й старіння ізоляції в цілому	Один з основних методів
3	Вимірювання ємності	Загальне зволоження ізоляції	В основному для контролю вологості трансформаторів і електричних машин

№ п/п	Метод випробовування ізоляції	Дефекти, що виявляють цим методом	Загальна характеристика методу
4	Визначення наявності часткових розрядів	Процеси іонізації в повітряних порожнинах	Додатковий метод (одержує все більше поширення)
5	Вимірювання розподілу напруги	Частковий пробій, некрізні шляхи витоку	Основний метод для гірлянд ізоляторів
6	Прикладення підвищеної напруги	Місцеві дефекти при зниженні електричної міцності	Контроль мінімального запасу електричної міцності

2.6.2. Вимірювання опору ізоляції (струмів витоку)

Цей метод через свою простоту знайшов дуже широке застосування в практиці і є одним з основних методів контролю якості ізоляції.

Відомо, що будь-яка ізоляція має скінченну величину опору, хоч й досить велику. Тому при прикладенні напруги через ізоляцію, крім струмів на зарядку геометричної ємності й абсорбційних струмів, тече струм, зумовлений електропровідністю діелектрика. Зі збільшенням дефектності ізоляції струм витоку зростає. Це явище й покладене в основу даного методу.

Опір ізоляції

$$R_{iz} = \frac{U}{I} \quad (2.1)$$

На постійній нарузі R_{iz} буде змінюватися в часі, оскільки на величину струму будуть впливати процеси повільної поляризації. На рис. 2.10 відображений характер зміни струму через ізоляцію й опір ізоляції від часу.

Дослідним шляхом встановлено, що для більшості ізоляційних конструкцій час досягнення сталого значення струму витоку I менше 1 хв., тобто R_{iz} також досягне сталого значення.

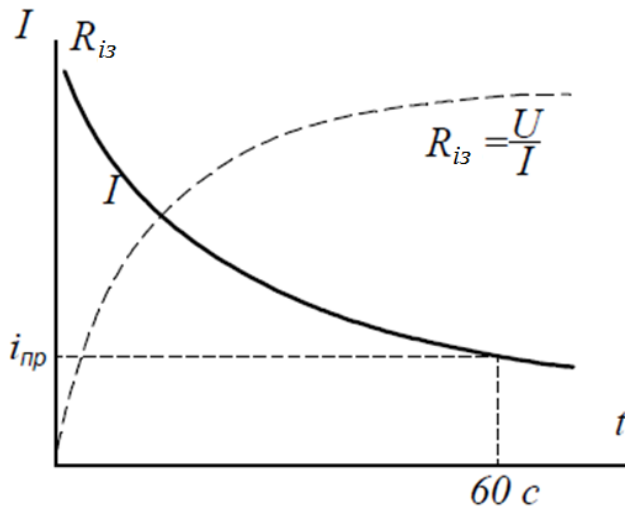


Рис. 2.10. Зміна струму витоку й опору ізоляції в часі

Різде падіння R_{iz} вказує на те, що розвиток дефекту в ізоляції зайшов далеко, або на наявність наскрізного провідного каналу, або пробую. Зазвичай висновок про стан ізоляції складається на підставі порівняння з результатом попередніх вимірювань R_{iz} або заводських даних.

Вимірювання опору ізоляції виконується за допомогою спеціальних приладів – мегаомметрів, в яких шкала проградуєвана в МОм або кОм.

Конструкції вітчизняних мегаомметрів для вимірювання різні. Найбільше застосування знайшли індукторні (з ручним приводом) типу М-110 на 500 В, МОМ-5 на 1000 В и МС-06 на 2500 В. У наш час знаходять широке застосування електронні мегаомметри, наприклад типу ЭСО210.

2.6.3. Вимірювання $\text{tg } \delta$

Діелектричні втрати в ізоляції характеризуються кутом діелектричних втрат. Якщо розглянути рис. 2.11, то $\text{tg } \delta$ визначається відношенням активної складової струму в діелектрику до ємнісної складової

$$\text{tg } \delta = \frac{I_a}{I_c}, \quad (2.2)$$

де I_a – активна складова струму через діелектрик;
 I_c – реактивна складова струму через діелектрик.

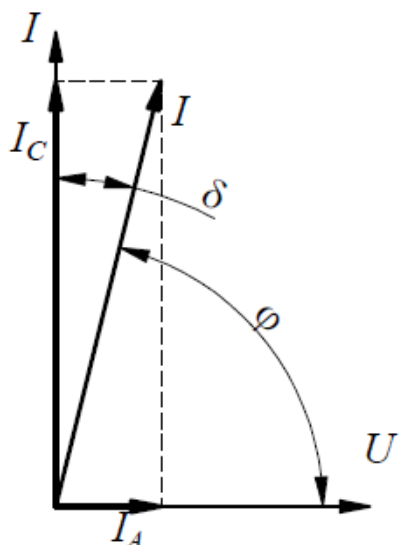


Рис.2.11. Векторна діаграма струмів через діелектрик із втратами

Вимірювання величини $\operatorname{tg} \delta$, а не величини самих діелектричних втрат

$$P = U \times I_c \times \operatorname{tg} \delta = \omega U C \operatorname{tg} \delta \quad (2.3)$$

має наступні переваги:

1) величина $\operatorname{tg} \delta$ як характеристика матеріалу не залежить від розмірів об'єкта, але дозволяє виявити виникаючі в ізоляції дефекти, особливо якщо вони поширені по всьому об'ємі;

2) величину $\operatorname{tg} \delta$ можна безпосередньо поміряти мостом змінного струму.

Метод контролю ізоляції шляхом вимірювання кута діелектричних втрат є найефективнішим і розповсюдженим. Він дозволяє виявити наступні дефекти: зволоження, повітряні (газові) включення із процесами іонізації, неоднорідності й забруднення та ін.

Вимірювання $\operatorname{tg} \delta$ виконуються при напрузі $U \leq 10$ кВ і частоті 50 Гц за допомогою високовольтних мостових схем (міст Шеринга). Оцінювання стану ізоляції за значенням $\operatorname{tg} \delta$ передбачається нормативами майже для всіх видів ізоляції. Залежно від конструктивних особливостей об'єкта (заземлений один електрод чи ні) використовується нормальна або перевернена схеми мосту Шеринга.

За нормальною схемою звичайно виконуються вимірювання у лабораторіях, а також вимірювання міжфазної ізоляції (кабель, трансформатор та ін.).

Випускаються мости типу МДП, які дозволяють вимірювати $\operatorname{tg} \delta$ при ємностях об'єктів від 40 до 20000 пф.

При роботі з перевернутою схемою потрібно мати на увазі, що від вимірювальних гілок і конденсатора C_3 (вимірюваний об'єкт) ідуть провідники, що перебувають під високою напругою.

Для вимірювань за перевернутою схемою застосовується малогабаритний переносний міст МД-16, що дозволяє вимірювати $\operatorname{tg} \delta$ при ємностях об'єкта від 30 до 40000 пф.

2.6.4. Методи виявлення часткових розрядів

1. Метод вимірювання електромагнітних хвиль, випромінюваних частковими розрядами (індикатори радіовипромінювань - ІРВ). ІРВ називають дефектоскопами.

Цей метод базується на радіоприйомі електромагнітних випромінювань при ЧР в ізоляції. Він найчастіше застосовується для виявлення дефектних ізоляторів на лініях електропередачі.

Недоліками цього методу є: погана перешкодостійкість (перешкоди створюються короною проводів та ін.); відсутність кількісної оцінки.

2. Метод діелектричних втрат, який базується на визначенні точки перегину на кривій залежності тангенса діелектричних втрат від напруги на діелектрику (рис. 2.12), що називається кривою іонізації. Злам на цій кривій збігається з виникненням часткових розрядів в об'ємі ізоляції.

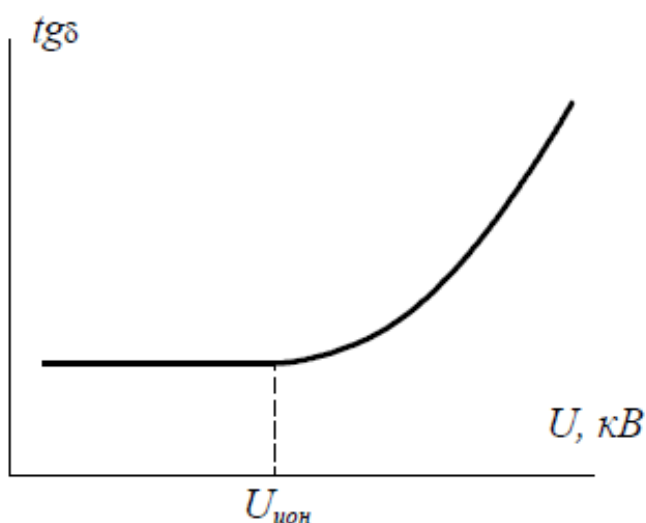


Рис. 2.12. Крива іонізації

До недоліків цього методу можна віднести неможливість зареєструвати дефекти й місце їх знаходження. У цей час метод реєстрації точки перегину на кривій іонізації витісняється методами реєстрації високочастотних складових струму або напруги часткових розрядів.

2.6.5. Методи реєстрації високочастотних складових часткових розрядів (індикатори часткових розрядів - ІЧР)

Нагайною потребою є створення такої техніки для визначення часткових розрядів, що дозволяла б реєструвати найслабші часткові розряди й забезпечувала кількісні вимірювання енергії, що розсіюється одиночними розрядами. Цю вимогу зараз втілюють в індикаторах часткових розрядів, які безпосередньо вмикаються у ланцюг розряду. Вони складаються із приймального контуру, підсилювача й вимірювального приладу. В основу покладено вимірювання уявного заряду:

$$\Delta Q_0 = \Delta UC_0,$$

де C_0 – ємність ізоляції.

Вимірюються пульсації напруги ΔU , які через підсилювач подаються на пластини ЕО. За моментом виникнення пульсацій на екрані осцилографа визначають напругу виникнення іонізації, а за амплітудою імпульсів і їхньою частотою - інтенсивність часткових розрядів. Існує кілька варіантів схеми.

а) Схема з активним опором (рис. 2.13).

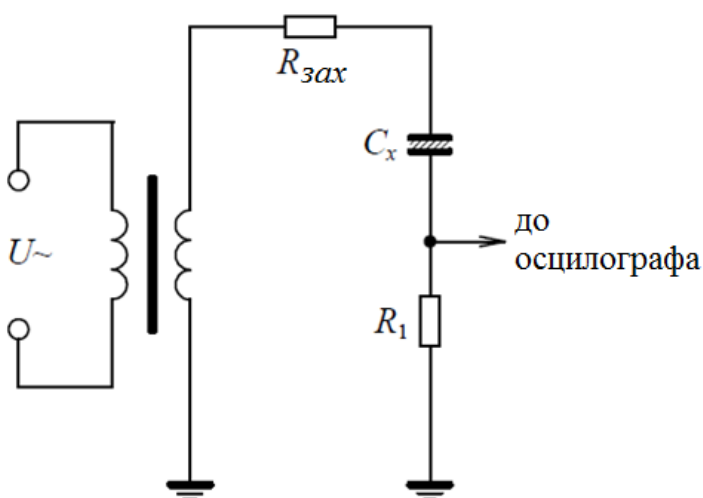


Рис. 2.13. Схема для виявлення часткових розрядів за допомогою активного опору:
 $R_{зах}$ – захисний опір;
 C_x – випробовуваний об'єкт;
 R_1 – опір дільника.

Опір R_1 підє'днується послідовно з вимірюваним об'єктом і спад напруги на ньому реєструється індикатором часткових розрядів. За осцилографом судять про наявність часткових розрядів. Недоліком цього методу є мала перешкодостійкість.

На осцилографі можна спостерігати картину, наведену на рис. 2.14.

б) Схема з індуктивністю і ємністю (рис. 2.15).

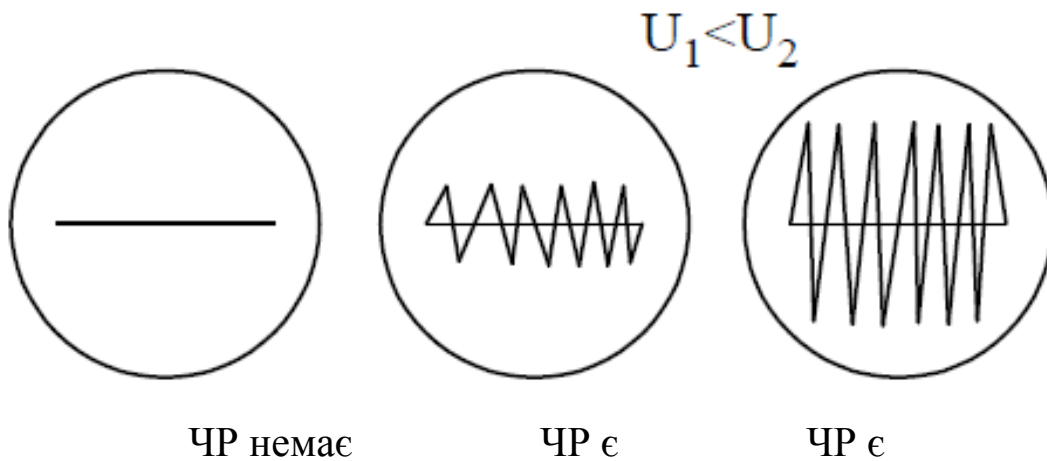


Рис. 2.14. Вид осцилограм при різній інтенсивності часткових розрядів

$$T = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (2.3)$$

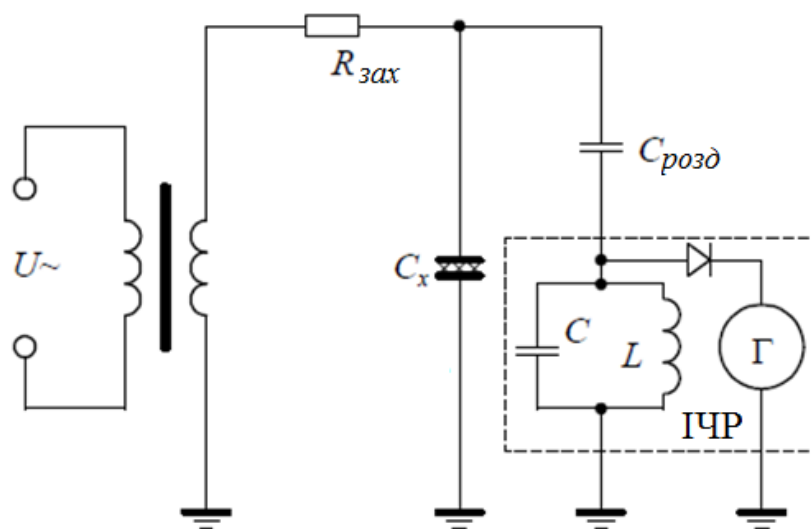


Рис. 2.15. Схема вимірювання часткових розрядів із застосуванням коливального контуру й гальванометра: $R_{зах}$ – захисний опір; C_x – випробовуваний об'єкт; $C_{розд}$ – роздільна ємність, L - C – коливальний контур, Γ – гальванометр.

Як було показано вище, при виникненні ЧР з'являються високочастотні коливання амплітудою ΔU . Індикатор часткових розрядів (ІЧР) під'єднаний до об'єкта через роздільну ємність $C_{\text{розд}}$, що служить фільтром для струмів робочої частоти.

При виникненні ЧР в об'єкті (C_x) хаотичні коливання напруги на об'єкті збуджують в ІЧР незатухаючі періодичні коливання із частотою, що відповідає періоду коливань контуру.

Частота налаштування ІЧР звичайно приймається порядку кількох десятків кілогерц. Амплітуда високочастотних коливань ΔU вимірюється гальванометром Г. За значенням ΔU з формули (2.1) визначається уявна інтенсивність іонізації.

Необхідно зазначити, що використання методу ЧР для профілактичних випробовувань є досить перспективним і зараз широко впроваджується в промисловості, тому що він дозволяє вести безперервний контроль під робочою напругою.

Але слід зазначити й недоліки:

- 1) наявність великої кількості перешкод, що утруднюють розшифровку отриманих результатів (джерело перешкод - корона на проводах, іскріння колекторів електричних машин і т.д.);
- 2) метод фіксує не наявність дефекту, а наявність ЧР, у той час як може існувати дефект і без ЧР (тріщина, заповнена водою або іншою провідною рідиною, обвуглена пора, де припинилися ЧР, хоч це й серйозні дефекти).

Але в комбінації з іншими методами профілактики індикація часткових розрядів дає ефективні результати.

2.6.6. Контроль вологості ізоляції

Ємність ізоляції при постійній температурі й частоті прикладеної напруги є величиною постійною. Тому стрибкоподібна зміна величини ємності вказує на наявність в ізоляції дефектів. Особливо суттєво впливає на зміну ємності зволоження ізоляції, тому для контролю зволоження ізоляції знайшли метод вимірювання ємності ізоляції при різних частотах, що одержав назву метод "ємність – частота".

При збільшенні частоти ємність ізоляції якого-небудь пристрою (трансформатора, кабелю, ізолятора тощо) зменшується. Це явище покладене в основу методу "ємність – частота". Метод "ємність – частота" полягає в порівнянні

величин ємності, виміряних при двох різних частотах $f = 2$ Гц і $f = 50$ Гц, (C_2 і C_{50}) при $t = 10 - 20$ °С. Про якість ізоляції судять за відношенням C_2 / C_{50} ; чим це відношення менше, тим ізоляція краща (сухіша).

На рис. 2.16 зображені залежності зміни ємності від частоти для сухої (1) і зволоженої ізоляції (2).

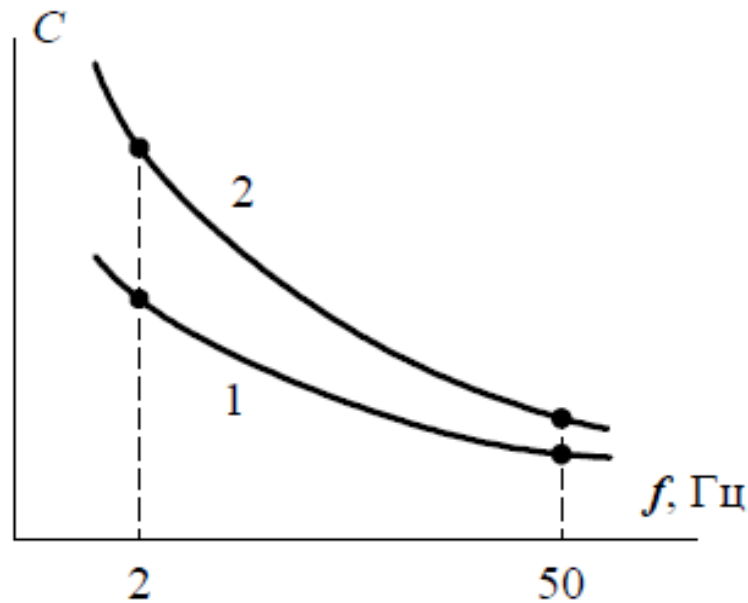


Рис. 2.16. Залежність ємності ізоляції від частоти: 1 – суха ізоляція; 2 – зволожена ізоляція

Дослідним шляхом було встановлено співвідношення для сухої ізоляції:

$$k_f = \frac{C_2}{C_{50}} \leq 1,2 - 1,3.$$

2.6.7. Випробовування підвищеною напругою

Як ми вже знаємо, у процесі експлуатації ізоляція електротехнічних пристроїв старіє, її електрична міцність знижується й час життя зменшується. Особливо сприяють старінню температурні, механічні та електричні впливи. Старіння ізоляції відбувається нерівномірно. Неоднорідність ізоляції і зовнішніх впливів приводять до того, що швидкість процесів старіння на різних ділянках неоднакова. Утворюються місця, які мають значно меншу електричну міцність, ніж

«здорова» ізоляція. У більшості випадків (наприклад в електричних машинах) причиною аварії є пробої ізоляції в місцях утворення зосереджених дефектів. Щоб запобігти аварійним ушкодженням, ізоляцію періодично випробовують підвищеною напругою для виявлення небезпечних дефектів і для перевірки наявності необхідного запасу електричної міцності ізоляції.

Випробовування підвищеною напругою гарантує також, що ізоляція устаткування має потрібний рівень міцності стосовно перенапруг, що виникають при експлуатації.

Іспитова напруга повинна прикладатися до ізоляції протягом часу, достатнього для розвитку часткових розрядів і навіть розвитку розряду до пробою. Водночас при тривалому прикладенні підвищеної напруги електрична міцність ізоляції різко знижується. На практиці застосовують однохвилинні випробовування напругою промислової частоти 50 Гц.

Ефективність випробовування визначається величиною іспитової напруги. При малій напрузі дефекти не виявляються, а при надмірно високій можуть пробитися ті ділянки ізоляції, які не пробилися б під час експлуатації. Іспитова напруга нормується.

Під час випуску готових виробів випробовування підвищеною напругою є основним видом діагностики ізоляції. Іспитові напруги для різних типів устаткування визначені діючими стандартами.

При профілактичних випробовуваннях у процесі експлуатації величина іспитової напруги повинна становити $\sim 0,75$ від величини заводської іспитової напруги.

Випробовування підвищеною напругою здійснюються на змінній, постійній і імпульсній напругах.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ:

1. Для чого призначені лінійні ізолятори?
2. Наведіть приклади лінійних ізоляторів.
3. Які ізолятори називають станційно-апаратними?
4. Для чого призначені опорні ізолятори?
5. Яке призначення прохідних ізоляторів?
6. Які ізолятори називають вводами?
7. Наведіть приклади станційно-апаратних ізоляторів.

8. Поясніть будову маслобар'єрного вводу та наведіть його характеристики.
9. Поясніть принципи ізоляції високовольтних конденсаторів.
10. Поясніть принципи ізоляції трансформаторів.
11. Як виконують ізоляцію кабелів.
12. Яке призначення масло наповнених кабелів?
13. Поясніть принципи ізоляції електричних машин.
14. Які мета та завдання профілактики ізоляції?
15. Поясніть методику вимірювання опору ізоляції.
16. Поясніть методику вимірювання тангенсу кута діелектричних втрат.
17. Які методи виявлення часткових розрядів?
18. Які методи реєстрації високочастотної складової часткових розрядів?
19. Для чого та яким чином здійснюється контроль вологості ізоляції?
20. Опишіть методику випробовування підвищеною напругою

РОЗДІЛ ІІІ. ВИСОКОВОЛЬТНЕ ВИПРОБОВУВАЛЬНЕ ТА ВИМІРЮВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ

3.1. Установки для одержання високих змінних напруг

Для одержання високих змінних напруг застосовуються однофазні високовольтні іспитові трансформатори напруги до $U_H = 1200$ кВ. Для великих напруг використовують каскадне з'єднання трансформаторів ($U_H = 2200$ кВ і більше).

Особливістю іспитових трансформаторів є:

- 1) короткочасність роботи;
- 2) відсутність атмосферних перенапруг;
- 3) наявність стрибків струму й різких спадів напруги при пробоях і перекриттях випробовуваних об'єктів.

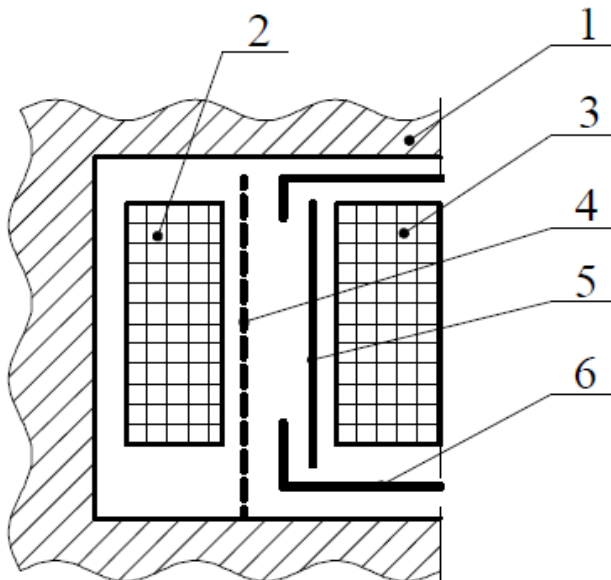


Рис. 3.1. Конструкція

однофазного

трансформатора:

1 – магнітопровід;

2 – обмотка низької напруги;

3 – обмотка високої напруги;

4 – екран мідний;

5 – бар'єр електроізоляційний;

6 – шайби електроізоляційні.

Як правило, між обмотками низької й високої напруг розташований мідний розрізаний екран, з'єднаний із баком трансформатора. Екран призначений для захисту обмотки низької напруги від наведення високих потенціалів при різких змінах напруги з боку високовольтної обмотки.

Для напруги більше 1000 кВ застосовуються каскадні з'єднання трансформаторів. Каскади трансформаторів звичайно складаються з 2-3 високовольтних іспитових трансформаторів, з'єднаних послідовно. Оскільки один вивід обмотки трансформатора з'єднаний із корпусом, то корпус кожного наступного трансформатора перебуває під високою напругою попереднього трансформатора. Отже, всі наступні

трансформатори, крім першого, повинні бути ізольовані від землі й один від одного.

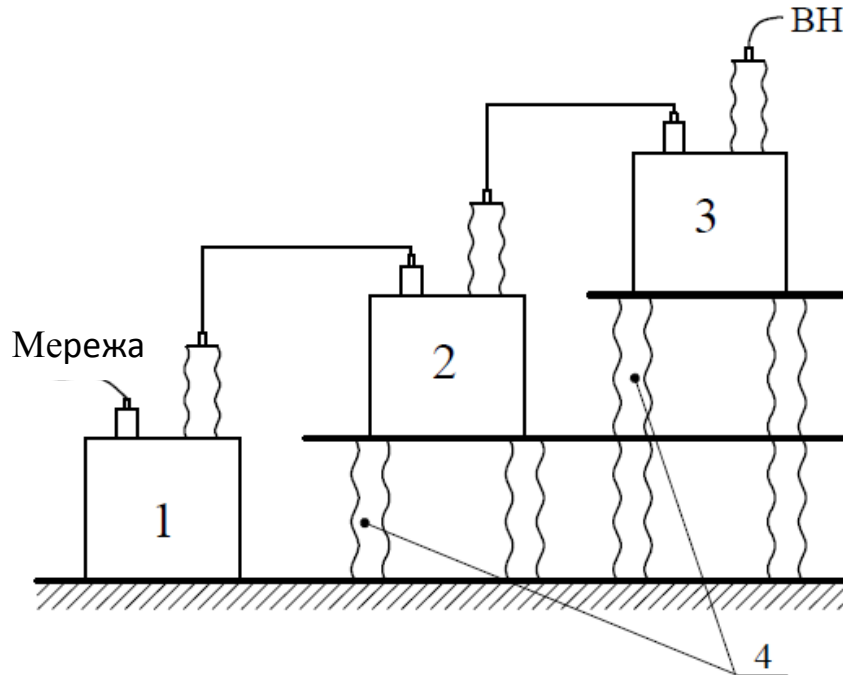


Рис. 3.2. Спрощена схема з'єднання каскаду трансформаторів: 1 - 3 – високовольтні трансформатори, 4 – опорні ізолятори

Напруга на виході каскаду, що складається з n послідовно з'єднаних трансформаторів,

$$U_{\text{ВН}} = n \times U_2,$$

де U_2 – напруга на виході першого трансформатора.

3.2. Установки для одержання високих постійних напруг

Постійну напругу часто використовують для випробовувань конденсаторів, кабелів, обертальних машин.

Для одержання високих напруг постійного струму використовуються різні випрямні установки. Всі схеми випрямлення класифікуються за наступними ознаками:

1) за формою випрямленої напруги - одно- і двопівперіодні схеми;

2) за схемою з'єднання випрямлячів - мостова схема, послідовно-паралельні схеми;

3) за кількістю фаз: одно-, дво- і трифазні схеми;

4) за схемами множення напруги.

Однопівперіодна схема випрямлення наведена на рис. 3.3.

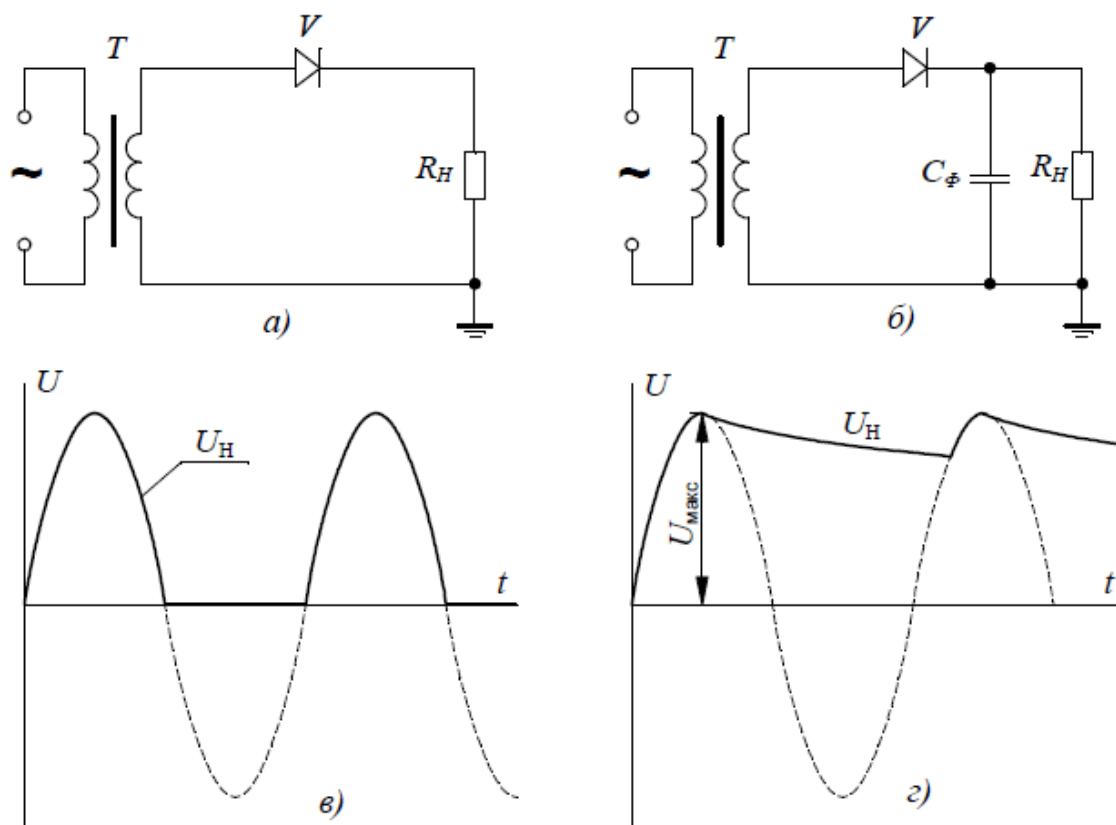


Рис. 3.3. Однопівперіодна схема випрямлення: а), в) – без фільтра; б), г) – з фільтром; T – високовольний трансформатор; V – випрямляч; R_H – опір навантаження; C_Φ – ємність фільтра

Випрямлення напруги без фільтра (рис. 3.3, а) дає велику глибину пульсацій випрямленої напруги (рис. 3.3, в). Наявність фільтра (рис. 3.3, б) зменшує глибину пульсацій (рис. 3.3, г) за рахунок підживлення від конденсатора C_Φ протягом часу негативного півперіоду, коли випрямляч V закритий.

Двопівперіодна мостова схема випрямлення наведена на (рис. 3.4). Чотири випрямлячі утворюють міст, до однієї діагоналі якого під'єднується навантаження R_H , а до іншої діагоналі – трансформатор. При "+" півперіоді відкриті випрямлячі V_1 і V_3 , а при "-" півперіоді – V_2 і V_4 . Отже, через навантаження протікає струм в одному напрямку протягом усього періоду змінного струму (рис. 3.4, а, в). Це основна перевага двопівперіодної схеми випрямлення. Фільтр C_Φ зменшує глибину пульсацій випрямленої напруги (рис. 3.4, б, г).

Увімкнення однофазних схем випрямлення приводить до перекосу фаз у трифазній мережі. Для виключення цього явища використовують трифазні схеми випрямлення (рис. 3.5, а). Крім

цього, зменшуються пульсації випрямленої напруги (рис. 3.5, б), особливо із застосуванням фільтра C_{Φ} .

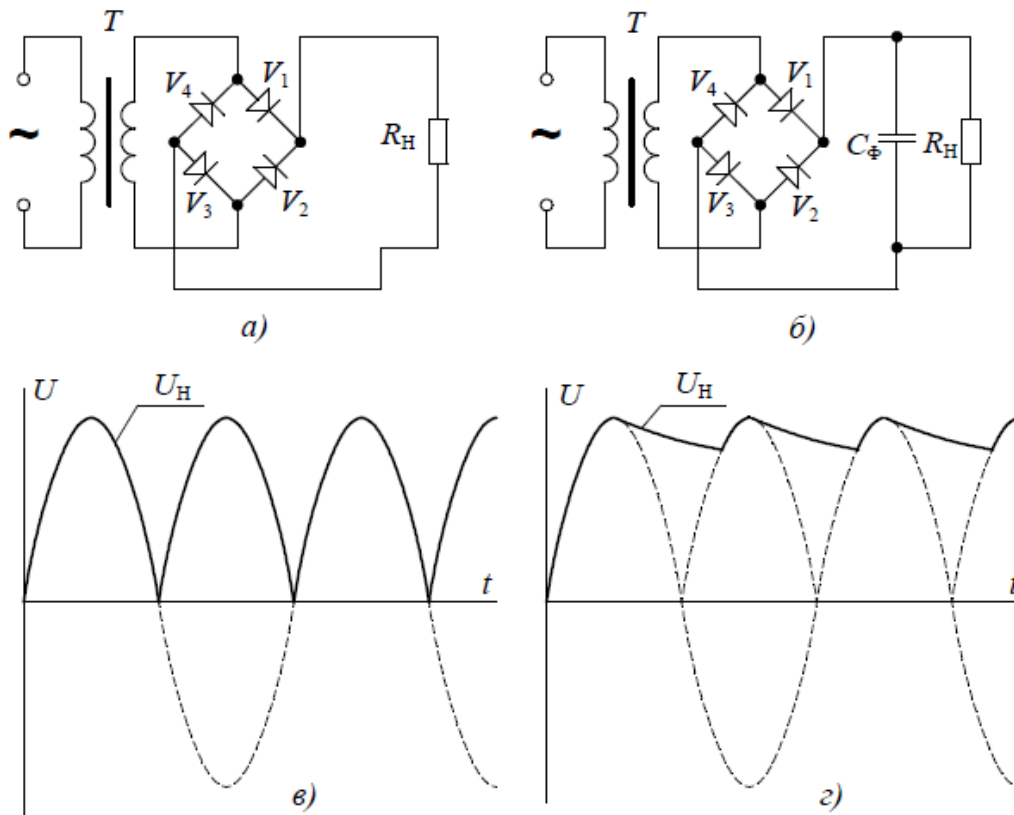


Рис. 3.4. Мостова схема випрямлення: а), в) без фільтра, б), г) з фільтром

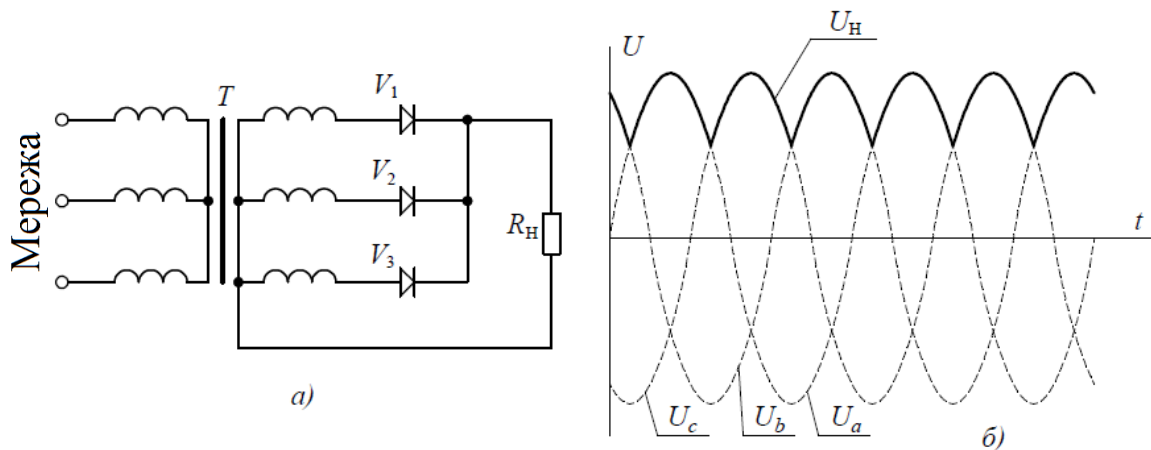


Рис. 3.5. Трифазна однопівперіодна схема випрямлення

Високі випрямлені напруги зручно одержувати за допомогою схем множення випрямленої напруги. Розрізняють:

- 1) схеми подвоєння;

- 2) схеми потроєння;
- 3) каскадні схеми множення напруги.

Найпростіша однопівперіодна схема подвоєння напруги наведена на рис. 3.6, а. У першому напівперіоді (позитивний) випрямляч пропускає струм. Ємність I_3 заряджається до U_m : обкладки мають полярність "+" і "-". У другому напівперіоді, коли змінилася полярність кінців обмотки трансформатора, напруга трансформатора "+" складеться з напругою на конденсаторі "-". На навантаженні виникає пульсуюча випрямлена напруга, що змінюється від нуля до $2U_m$ (рис. 3.6, б). Випрямляч виявляється також під подвійною напругою $U_{обр} = 2U_m$.

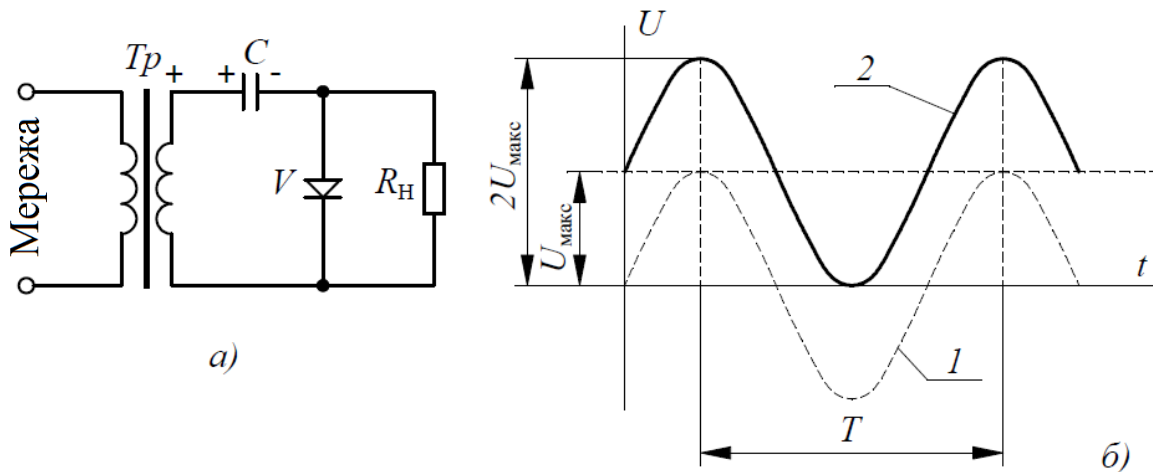


Рис. 3.6. Однопівперіодна схема подвоєння (а) і осцилограма напруги на навантаженні (б): 1 – фазна зміна напруги; 2 – подвоєна випрямлена напруга

3.2.1. Каскадний генератор постійного струму

Одержати високі напруги постійного струму в сотні й тисячі кіловольт можливо за допомогою схем випрямлення й множення випрямлених високих напруг (каскадний генератор).

Схема каскадного генератора постійного струму складається зі схем подвоєння напруги, з'єднаних у багаторазовій послідовності. Напруга на виході каскадного генератора:

$$U_{вих} = 2 \times n \times U_m,$$

де n – кількість щаблів (схем подвоєння) у каскаді; U_m – амплітудне значення напруги первинного трансформатора.

3.3. Імпульсні випробувальні установки

Для випробування ізоляції високовольтного електроустаткування грозовими й комутаційними імпульсами використовуються генератори імпульсних напруг (ГІН).

Грозові впливи відтворюються стандартними імпульсами напруги: повною і зрізаною хвилями. Стандартні імпульси (1,2/50 або 2,0) можна одержати на установці (рис. 3.7).

Зарядка ємностей C відбувається паралельно, а розряджаються вони послідовно, що приводить до додавання зарядних напруг щаблів.

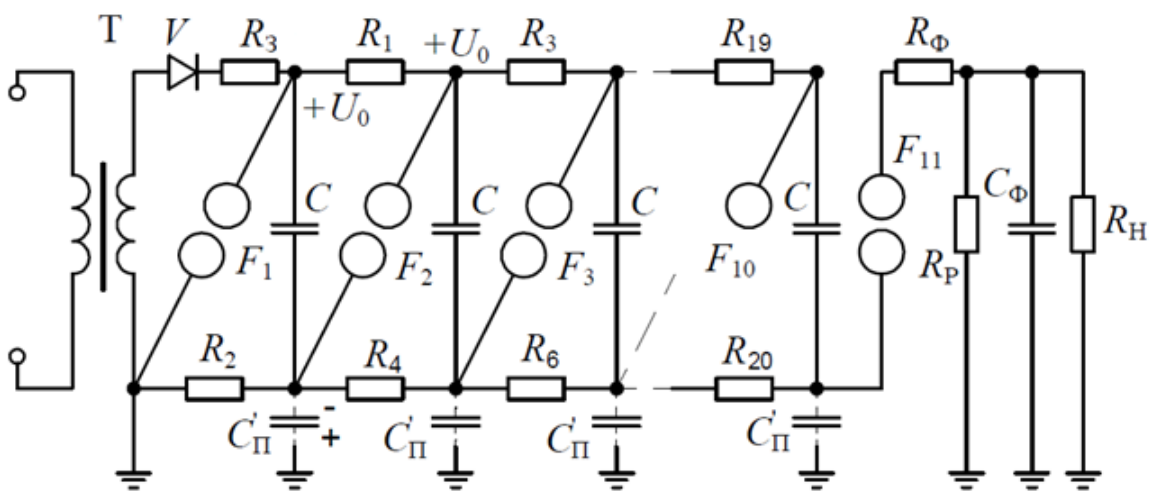


Рис. 3.7. Принципова електрична схема ГІН з односторонньою зарядкою: T – високовольтний трансформатор; V – випрямляч; $R_{зax}$ – опір для обмеження зарядного струму; R_1 – R_{20} – зарядні опори; F_1 – F_{11} – іскрові проміжки; C – ємності щабля ГІН; C_{Π}' – "паразитні" ємності; R_{Φ} , C_{Φ} – фронтові опір і ємність; $R_{р}$ – розрядний опір; $R_{н}$ – опір навантаження

Для забезпечення практично однакової зарядки всіх конденсаторів до U_0 необхідно дотримуватись умови: $R_1 \dots R_{20} \ll R_{зax}$. При напрузі U_0 пробивається тільки F_1 . Ємність розряджається в контурі $C - R_2 - F_1$, але R_2 велике (десятки кілоом). У перший момент розрядка йде по $C - C_{\Pi}' - F_1$ ($X_c = 1/\omega C$, ω – кругова частота порядку мегагерц, отже, X_c – мале). C_{Π}' швидко заряджається до U_0 . Тоді до F_2 прикладена подвоєна зарядна напруга U_0 . Тому F_2 може мати відстань у 2 рази більшу, ніж F_1 і т.д.

Для регулювання параметрів імпульсу напруги й одержання стандартної хвилі використовуються елементи: R_{Φ} – фронтовий опір; C_{Φ} – фронтова ємність; R_p – розрядний опір. Довжину фронту формують C_{Φ} і R_{Φ} , довжину імпульсу – R_{Σ} , тобто R_p разом із R_H .

$$t_{\Phi} = 3,24 \times R_{\Phi} C_{\Phi};$$

$$t_{\sigma} = 0,7 \times C_{ГН} \times R_{\Sigma}.$$

Зміна амплітуди імпульсу регулюється зміною відстані між кульовими електродами $F_1, F_2, \dots, F_{10} \dots$. Проміжок F_{11} служить для відділення зарядної ємності ГН від навантаження при зарядці конденсаторів постійною напругою, щоб виключити вплив постійної зарядної напруги на навантаження.

ГН використовується для випробовування ізоляції високовольтного устаткування. Внутрішня ізоляція випробовується прикладенням трьох повних і трьох зрізаних імпульсів позитивної й негативної полярності.

3.3.1. Генератор імпульсів струму (ГІС)

Генератори імпульсів струму використовуються для імітації дії імпульсів струму великої амплітуди. Електрична схема ГІС наведена на рис. 3.8.

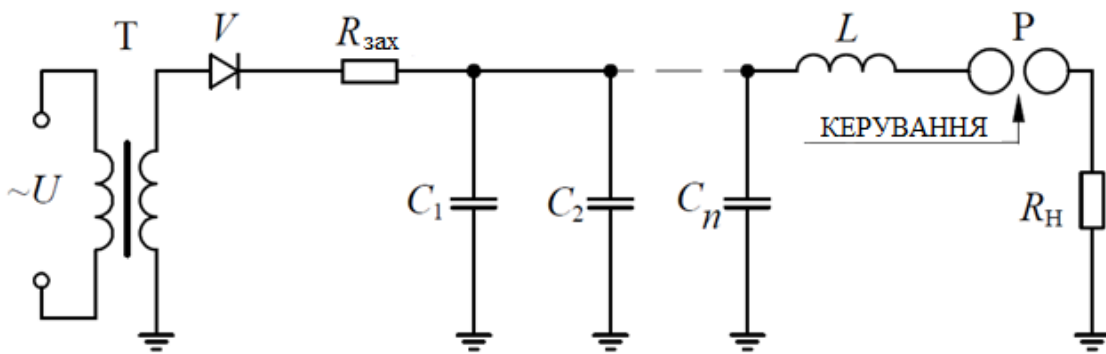


Рис. 3.8. Електрична схема ГІС: V – високовольтний випрямляч; $R_{\text{ЗАХ}}$ – опір для обмеження зарядного струму; $C_1 - C_n$ – батарея конденсаторів; P – розрядник керований; R_H – навантаження; L – індуктивність розрядного контуру

Після спрацьовування розрядника P батарея конденсаторів розряджається на опір навантаження. Наприклад, у канал

розряду після пробою. Величина струму визначається, у першу чергу, індуктивністю і ємністю розрядного контуру

$$I_m = \frac{U_0}{\sqrt{\frac{L}{C}}}, \quad (3.1)$$

де U_0 – зарядна напруга; L – індуктивність контуру; $C = n \cdot C_1$ (якщо $C_1 = C_2 = \dots = C_n$) – ємність розрядного контуру.

3.4. Вимірювання високих напруг

3.4.1. Кульові розрядники

Для вимірювання високих напруг широко використовуються кульові розрядники. Це універсальний вимірювальний пристрій, яким можна вимірювати амплітудні значення постійної, змінної, високочастотної та імпульсної напруг.

Величина пробивної напруги залежить від відстані між кулями, їхнього діаметра, способу під'єднання (симетричне або одна куля заземлена), відносної густини повітря δ .

Для одержання високої точності необхідно виконати ряд умов.

1. Відстань між кулями не повинна перевищувати $S \leq 0,5D$, де D – діаметр куль. Отже, для широкого діапазону вимірюваних напруг потрібний набір куль різного діаметра.

2. Поверхня куль повинна бути гладкою й чистою. Шар пилу знижує пробивну напругу.

3. Відстань від куль до заземлених або предметів, що перебувають під напругою, повинна *бути* не менша $L > 5 D$.

4. Для одержання стабільних результатів вимірювань необхідне опромінення розрядного проміжку ультрафіолетовим випромінюванням або радіоактивними ізотопами, особливо при малих відстанях між кулями.

5. Вимірювання варто виконувати 4-5 разів і за вимірювану величину приймати середнє арифметичне значення, тому що має місце статистичний розкид пробивних напруг.

Вимірювання постійних і змінних напруг виконуються в такий спосіб. Спочатку встановлюється свідомо велика відстань між кулями, що виключає пробій при вимірюваній напрузі.

Потім до кульового розрядника прикладається напруга й відстань між кулями плавно зменшується до виникнення пробоя проміжку. Ця процедура повторюється 4-5 разів. Визначається середня пробивна відстань, потім за таблицями вибирається відповідна напруга.

При вимірюванні амплітуди імпульсної напруги за пробивну відстань між кулями приймають таку, при якій половина поданих імпульсів, прикладених до розрядника, викликає пробій проміжку, а половина ні. Цю напругу називають 50% пробивною напругою. Величину пробивної напруги визначають із таблиць за отриманою пробивною відстанню.

При вимірюванні користуються градуювальними таблицями, що відображають зв'язок пробивної напруги з діаметром кульових електродів і відстанню між ними. У таблицях дані амплітудні значення пробивної напруги. Таблиці Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК) складені для нормальних атмосферних умов ($P=760$ мм рт. ст. і $T=20$ °C).

У тих випадках, коли вимірювання здійснюються в умовах, відмінних від нормальних, вводиться поправка на відносну щільність повітря δ . Тоді шукане значення напруги буде дорівнювати $U_{\text{н}} = U_{\text{т}} \cdot \delta$, де $U_{\text{т}}$ – табличне значення пробивної напруги; $\delta = 0,386P/(273+T)$, де P і T – відповідно тиск у мм.рт.ст і температура в градусах Цельсія навколишнього середовища при виконанні вимірювань.

Крім кульових розрядників, є ще цілий ряд пристроїв і приладів для вимірювання високої напруги.

3.4.2. Електростатичні вольтметри

Розглянемо найбільш широко застосовувані електростатичні вольтметри.

Електростатичні вольтметри вимірюють діюче значення напруги. Принцип дії базується на механічному переміщенні одного з електродів вольтметра під дією електростатичних сил. Вимірювання виконуються за рахунок зрівноважування цієї механічної сили вантажем або пружиною

$$F = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}{l^2 \cdot 2} U^2 = KU^2, \quad (3.2)$$

де S – площа рухомого електрода; l – відстань між електродами,

$$U = \sqrt{\frac{F}{K}}, K = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}{2l^2} \quad (3.3)$$

Схема будови електростатичного вольтметра А. А. Чернишова наведена на рис. 3.9.

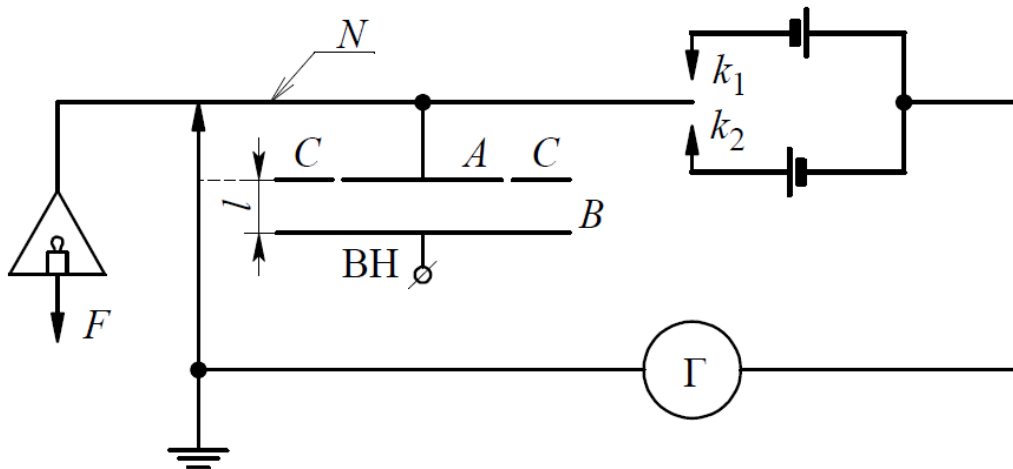


Рис. 3.9. Будова електростатичного вольтметра А. А. Чернишова: А – рухливий заземлений диск; В – нерухомий високовольтний диск; З – охоронне заземлене кільце; N – металеве заземлене коромисло; k_1 , k_2 – контакти ланцюга гальванометра; Г – гальванометр

Є кульові вольтметри, наприклад вольтметр Соренсена, Гобсона й Рамо.

У технічних електростатичних кіловольтметрах, наприклад, С100 на напруги до 75 кВ, зрівноважування рухливого електрода здійснюється пружинною розтяжкою, на якій укріплене дзеркальце. Відлік показів здійснюється за рахунок світлового променя.

3.4.3. Дільники напруги

Дільники напруги дозволяють не тільки вимірювати напругу, але й фіксувати форму сигналу за допомогою електронного осцилографа (рис. 3.10).

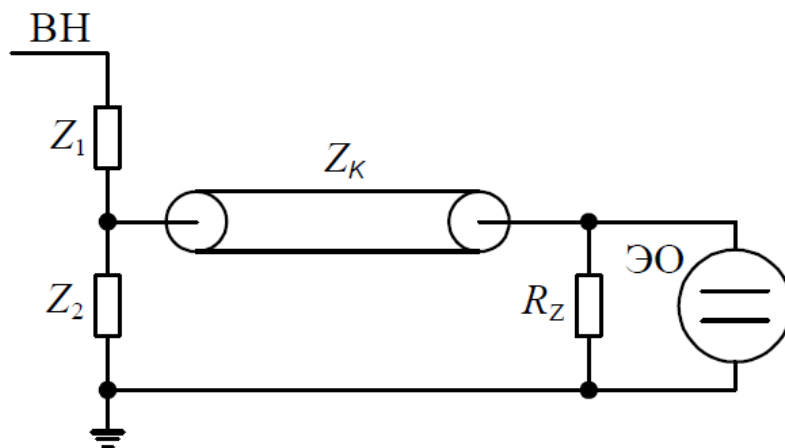


Рис. 3.10. Схема вимірювання високої напруги за допомогою дільника напруги

Застосовуються дільники: омичні, ємнісні й змішані омично-ємнісні.

Дільник характеризується коефіцієнтом розподілу K_d – відношення величини повного опору дільника до величини опору низьковольтного плеча з урахуванням передавального кабелю Z_k і вимірювального пристрою.

Вимоги до дільників напруги:

1. Коефіцієнт розподілу не повинен залежати від амплітуди, полярності, тривалості вимірюваної напруги.
2. Коефіцієнт розподілу не повинен залежати від зовнішніх електричних полів.
3. Дільник повинен бути зручним в експлуатації й відносно дешевим.

У кожного типу дільника є свої переваги й недоліки.

Найбільш універсальним є третій тип дільника – ємнісно-омичний, щоправда, він і найбільш складний.

3.4.3.1. Омичний дільник ($R_1 \gg R_2$)

Розглянемо схему омичного подільника (рис. 3.11). Як опір високовольтного плеча R_1 використовують рідинні або дровові малоіндуктивні резистори.

Рідинні резистори виготовляють, наприклад, з розчину CuSO_4 у дистильованій воді.

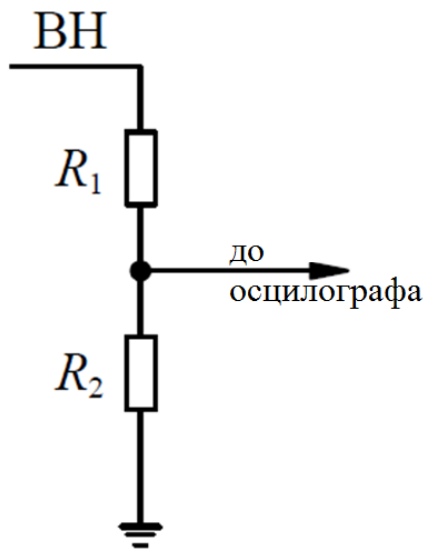


Рис. 3.11. Схема заміщення омичного дільника

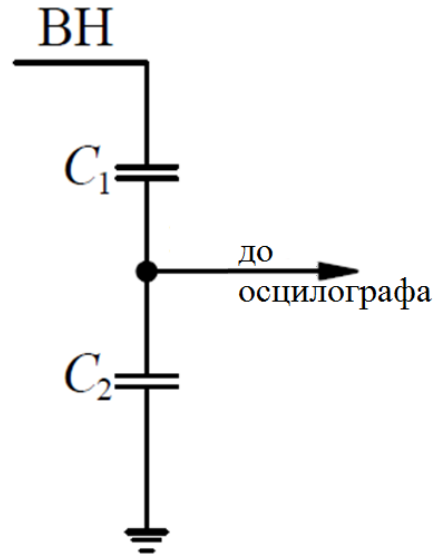


Рис. 3.12. Схема заміщення ємнісного дільника напруги

Недоліки рідинних омичних дільників: K_d залежить від температури та забруднення сторонніми іонами.

Дротові резистори виготовляють із високоомного дроту - ніхрому, константану. Застосовується малоіндуктивне біфілярне намотування з малим кроком. Індуктивність дротових резисторів більша, ніж рідинних. Це приводить до перекручування форми імпульсів при коротких часах впливу.

3.4.3.2. Ємнісний дільник ($C_2 \gg C_1$)

Розглянемо схему ємнісного дільника (рис. 3.12). Основний недолік ємнісного дільника: неможливо точно узгодити з передавальним кабелем, що приводить до наявності відбитого сигналу й перекручування основного. При коротких часах впливу краще, ніж омичний ДН. Складності при розрахунку K_d .

3.4.3.3. Змішаний дільник напруги

Розглянемо схему змішаного дільника напруги (рис. 3.13). Складність у налаштуванні змішаного дільника напруги полягає в тому, що K_d за C і R повинні бути однаковими. $K_{дс} = K_{др}$. Складно розрахувати K_d . Цей дільник має переваги – можна вимірювати короткі й довгі сигнали. Недоліки: складність виготовлення й дорожнеча. Дільник повинен

приєднуватися безпосередньо до об'єкта випробовувань, а не через довгі шини (рис. 3.14).

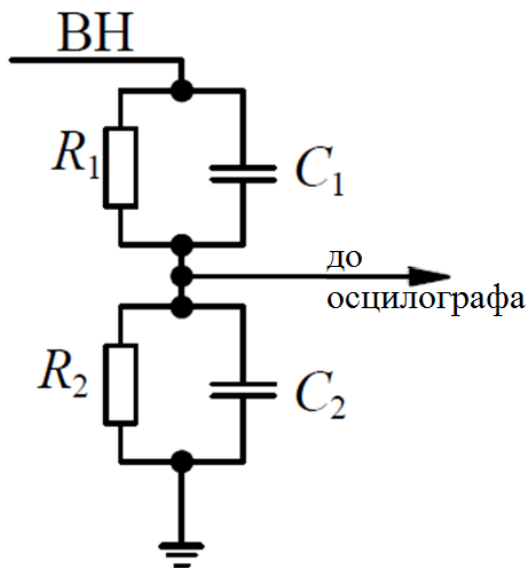


Рис. 3.13. Схема заміщення змішаного дільника напруги

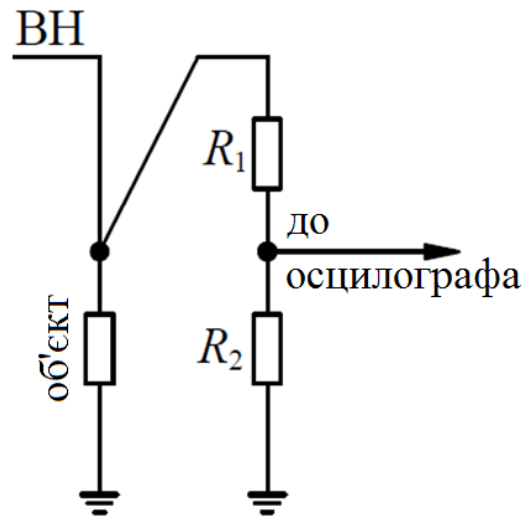


Рис. 3.14. Схема приєднання високовольтного дільника до об'єкта, на якому виконується вимірювання високої напруги

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ:

1. Наведіть приклади та поясніть принцип дії установки для одержання високих змінних напруг.
2. Наведіть приклади та поясніть принцип дії установки для одержання високих постійних напруг.
3. Поясніть принцип дії каскадного генератора постійного струму.
4. Поясніть принцип дії імпульсних установок для випробовувань.
5. Поясніть принцип дії генератора імпульсних струмів.
6. Яким чином вимірюють напругу за допомогою кульових розрядників?
7. Наведіть приклади та поясніть принцип дії електростатичних вольтметрів.
8. Для чого призначені дільники напруги?
9. Поясніть принцип дії омичного дільника
10. Поясніть принцип дії ємнісного дільника
11. Поясніть принцип дії змішаного дільника напруги

РОЗДІЛ IV. ПЕРЕНАПРУГИ Й ЗАХИСТ ВІД НИХ

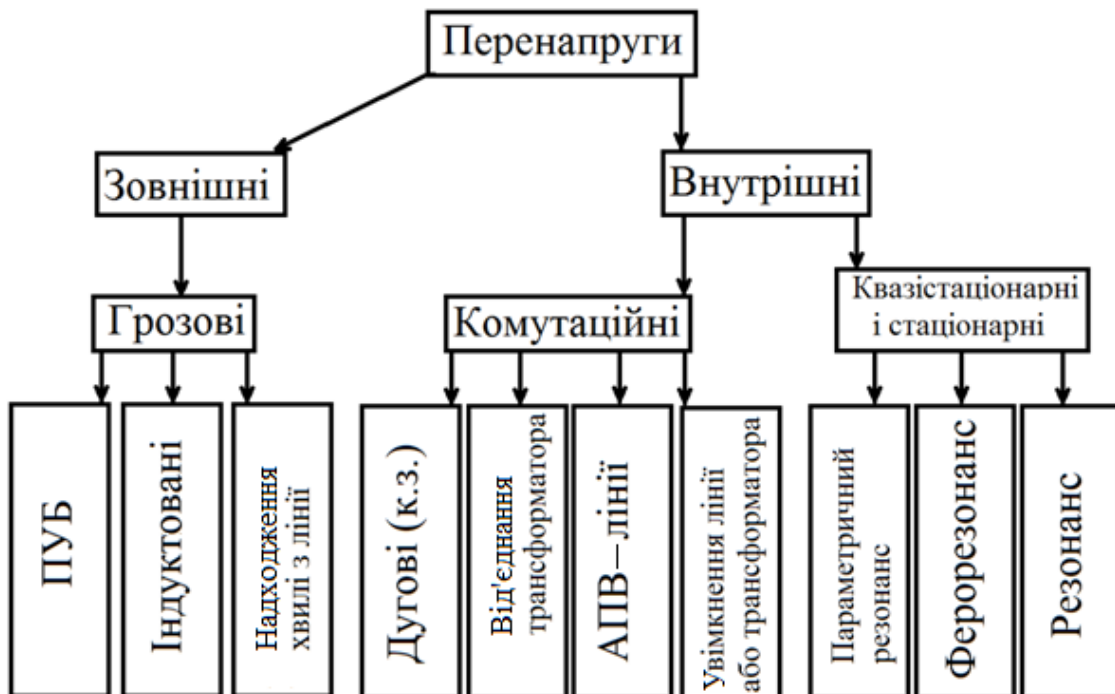
4.1. Класифікація перенапруг

Перенапряга – усяке підвищення напруги в електричній мережі більше максимальної робочої $U_{p.макс} = U_H + (0,2 \div 0,05) U_H$ залежно від класу напруги.

При перенапрягах створюються тяжкі умови для роботи ізоляції, тому що вони можуть у багато разів перевищувати $U_{p.макс}$. Перенапряги поділяються на:

1. зовнішні (грозові);
2. внутрішні (перехідні процеси в електричних мережах).

На схемі наведена класифікація перенапруг.



Необхідно знати наступні характеристики перенапруг:

1. Максимальне значення амплітуди напруги при перенапрязі $U_{макс}$ або кратність перенапруг

$$K_{\Pi} = \frac{U_{макс}}{U_{p.макс}}. \quad (4.1)$$

2. Тривалість впливу перенапруги.
3. Форму кривої перенапруг (аперіодична, коливальна, високочастотна та ін.)
4. Широту охоплення елементів електричного ланцюга.

Усі перераховані характеристики мають стохастичну природу й значний статистичний розкид, що обов'язково враховується при розрахунках. Для ізоляції високовольтних пристроїв низьких класів напруги ($U \leq 220$ кВ) найнебезпечнішими є грозові перенапруги. Їхня ізоляція витримує комутаційні перенапруги будь-якої кратності.

Для ізоляції високовольтних пристроїв високих і надвисоких класів напруги ($U > 330$ кВ) найнебезпечнішими є комутаційні перенапруги.

Тому на низьких класах напруги обмежують спеціальними пристроями тільки грозові перенапруги, а на високих класах примусово обмежують і внутрішні перенапруги.

4.2. Внутрішні перенапруги

Найбільш різноманітні внутрішні перенапруги. Причини виникнення внутрішніх перенапруг дуже різноманітні (вимкнення лінії, трансформаторів та інші перемикання; обриви фаз; к. з., перекриття ізоляторів і пробій).

Внутрішні перенапруги викликаються коливаннями енергії, накопленої в елементах мережі або поступаючої у мережу від джерел енергії (генератори, при зміні первісних параметрів). Елементи електричної мережі: джерела енергії; накопичувачі енергії (конденсатори, індуктивності); поглиначі енергії (активні опори, корона, провідність ізоляції).

Внутрішні перенапруги поділяються на комутаційні, квазістаціонарні (сталі), стаціонарні.

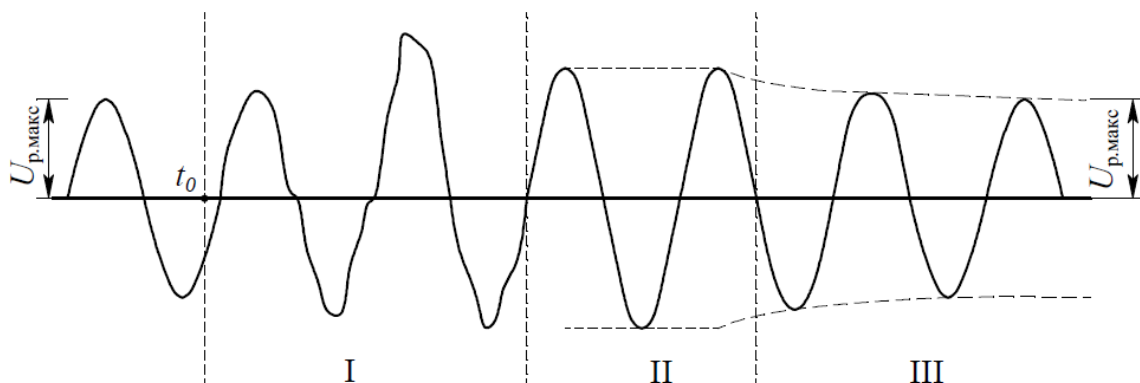


Рис. 4.1. Вигляд напруги мережі з появою внутрішніх перенапруг: t_0 – момент комутації

Умовний розвиток перенапруги графічно можна представити у вигляді кривої (рис. 4.1), яку можна розбити на три стадії.

I стадія – перехідний процес (комутаційні перенапруги). Триває кілька періодів.

II стадія – умовно сталий стан (квазістаціонарна). Перехідний процес завершився, але параметри ланцюга інші через високу напругу, а регулятори напруги на генераторах ще не встигли спрацювати.

III стадія – робота регуляторів напруги в генераторах. Зниження напруги до нової сталої робочої напруги.

Збільшення довжини й класу напруги лінії приводить до збільшення енергії в елементах мережі і, як наслідок, до збільшення кратності перенапруг. У зв'язку із цим для ліній класу $U > 330$ кВ здійснюється примусове обмеження перенапруг до рівнів:

$$30 \text{ кВ} - K_{\text{п}} = 2,7;$$

$$500 \text{ кВ} - K_{\text{п}} = 2,5;$$

$$750 \text{ кВ} - K_{\text{п}} = 2,2;$$

$$1150 \text{ кВ} - K_{\text{п}} = 1,8.$$

Обмеження перенапруг здійснюється захисними розрядниками (РЗ), трубчастими розрядниками (РТ), вентиляними розрядниками (РВ), нелінійними обмежувачами перенапруг (ОПН) і схемними рішеннями (реактори, конденсатори, активні опори та ін.).

4.3. Грозозахист повітряних ліній електропередач і підстанцій

Основною кількісною характеристикою розряду блискавки є амплітуда струму блискавки. Повітряні лінії електропередач (ВЛ) у районах із середньою тривалістю грозової діяльності (20-30 годин на рік) вражаються розрядами блискавки 15-20 разів на рік на 100 км довжини. Струми блискавки змінюються в широких межах від одиниць до сотень кілоампер. Середній розрахунковий струм блискавки становить 15 кА. При розряді блискавки в землю можуть вражатись різні об'єкти, зокрема повітряні лінії електропередачі, підстанції, станції. Протікання струму блискавки через об'єкт викликає виникнення хвилі

напруги блискавки, що може пробити й зруйнувати ізоляцію електротехнічних пристроїв. При розрахунках імпульсної електричної міцності користуються стандартною хвилею напруги.

4.3.1. Захист від прямих ударів блискавки

Для захисту об'єктів від враження блискавкою використовуються блискавковідводи. Залежно від об'єкта, застосовують стрижневі (підстанції) або тросові (ВЛ) блискавковідводи. Необхідною умовою ефективної роботи блискавковідводів є їхнє заземлення.

Найбільші грозові перенапруги виникають при прямому ударі блискавки (ПУБ) у лінію або підстанцію. У місці удару виникає короткочасна (імпульсна) напруга в мільйони вольт, тобто вище імпульсної електричної міцності ізоляції електропередач і електроустаткування. Для забезпечення надійної роботи електричної мережі необхідний її ефективний і економічний грозозахист.

Щоб захистити від ПУБ, об'єкт повинен повністю перебувати всередині простору, що являє собою зона захисту блискавковідводу.

Зоною захисту блискавковідводів називається простір навколо блискавковідводу, влучення в який розрядів блискавки мало ймовірно.

4.3.2. Зона захисту стрижневого блискавковідводу

Поверхню, що обмежує зону захисту стрижневого блискавковідводу, можна зобразити ламаною лінією (рис. 4.2).

Відрізок av – частина прямої, що з'єднує вершину блискавковідводу із точкою на поверхні землі, віддаленої на $0,75h$ від осі блискавковідводу. Відрізок vc – частина прямої, що з'єднує точку блискавковідводу на висоті $0,8h$ із точкою поверхні землі, розташованою на $1,5h$. Точка v перебуває на висоті $2/3h$. Радіус захисту на висоті $h_x < 2/3h$

$$r_x = 1,5h \left(1 - \frac{h_x}{0,8h} \right), \quad (4.2)$$

а на висоті $h_x > 2/3h$

$$r_x = 0,75h \left(1 - \frac{h_x}{h} \right). \quad (4.3)$$

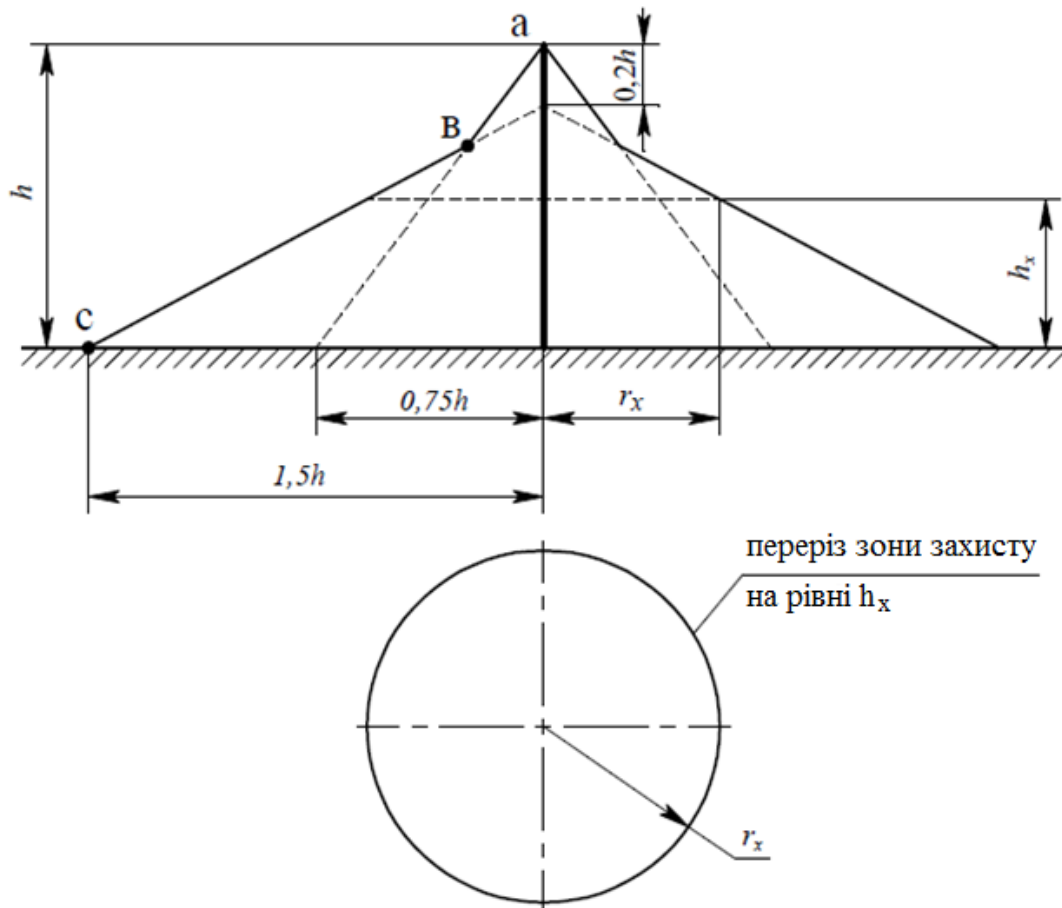
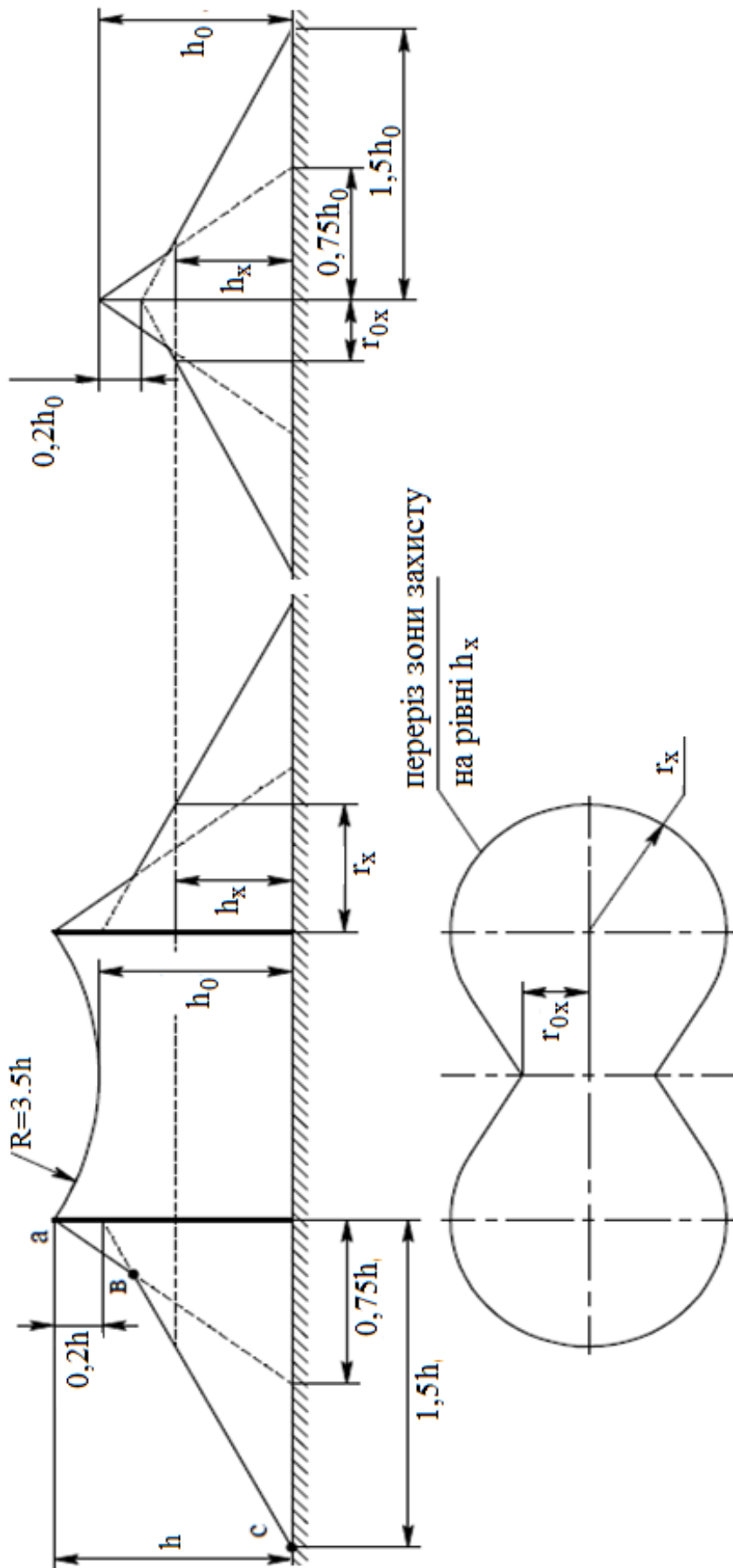


Рис. 4.2. Побудова зони захисту стрижневого блискавковідводу

Зона захисту двома блискавковідводами має більші розміри, ніж сума захисту двох одиночних блискавковідводів (рис. 4.3).

Відкриті розподільчі підстанції розташовуються на великій території. Їх доводиться захищати кількома блискавковідводами. Зона захисту визначається тим же шляхом, як і зона захисту двох блискавковідводів.

Таким чином правильне розташування блискавковідводів надійно захищає електричне обладнання електричних станцій та підстанцій і дозволяє економити матеріал.



переріз зони захисту
на рівні h_x

Рис. 4.3. Зона захисту двох стрижневих блискавководів

4.3.3. Зона захисту тросового блискавковідводу

Тросові блискавковідводи використовуються в основному для захисту проводів ВЛ. У зв'язку із цим користуються не зонами захисту, а кутами захисту, тобто кутами між вертикальною лінією, перпендикулярною тросу, і лінією, що з'єднує проводи й трос (рис. 4.4).

Лінії довжиною до 1000 км (ВЛ 500 кВ) вражаються блискавкою не менше 200 разів у грозовий сезон. Досвід експлуатації ВЛ показує, що кут захисту повинен бути 20-25 градусів (рис. 4.4.). Опір заземлення опор із глухозаземленою нейтраллю повинен бути менше 5 Ом, а з ізолюваною нейтраллю – менше 10 Ом.

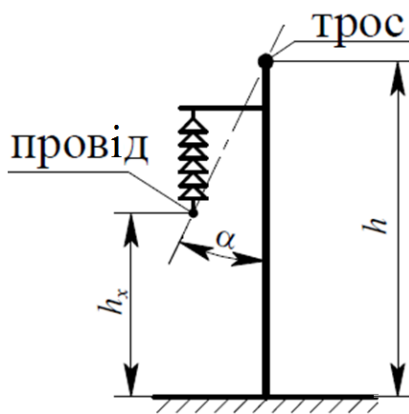


Рис. 4.4. Зона захисту тросового блискавковідводу

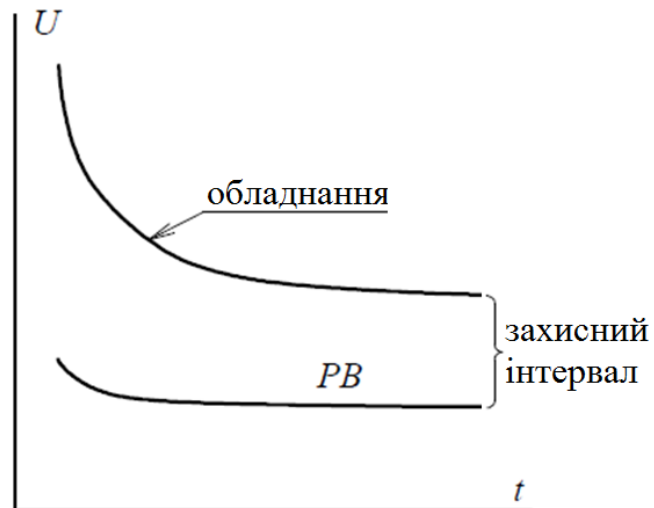


Рис. 4.5. Вигляд вольт-секундних характеристик об'єкта, що захищається, і PB

Грозозахист підстанцій, крім захисту від прямих ударів блискавки, повинен містити в собі наступні види захистів:

- 1) від перекриттів при ударах блискавки в заземлені конструкції підстанцій, тобто від зворотних перекриттів із заземлених елементів на струмопровідні частини устаткування;
- 2) від хвиль, що приходять із лінії.

Для виконання першої вимоги опір заземлення підстанції необхідно робити малим. Для напруги вище 1000 В опір заземлення підстанції $R_3 \approx 0,5$ Ом. Зменшення R_3 – найбільш ефективний шлях захисту від зворотних перекриттів.

Для виконання другої вимоги застосовуються вентиляльні розрядники (РВ) й обмежувачі перенапруги (ОПН). Вентильний розрядник має пологу вольт-секундну характеристику (ВСХ).

Це дозволяє йому захищати устаткування в широкому діапазоні змін довжин хвиль, що набігають із лінії (рис. 4.5). Для ефективного захисту необхідно, щоб:

1) напруга, що спадає, на робочому опорі не перевищувала припустиму;

2) крутизна хвилі, що набігає на підстанцію, була обмеженою.

Для виконання цих умов усі лінії, що підходять і відходять від підстанції, обладнуються тросовим захистом довжиною 2-3 км – захисні підходи. Кути захисту виконують менше 20°. Наявність захищених підходів виключає прямий удар блискавки в провід, що зменшує струми через РВ, отже, і напругу, що спадає на робочому опорі РВ.

При русі хвилі по проводу з лінії в захищеному підході виникає інтенсивне коронування, яке згладжує фронт хвилі (зменшує крутість імпульсу) і зменшує амплітуду напруги.

4.3.3. Грозоміцність об'єктів (ВЛ)

Повітряні лінії електропередачі через велику довжину вражаються найбільш часто. Тому порушення роботи енергосистем викликається в основному руйнацією ізоляції ВЛ.

При розрахунках грозоміцності ВЛ уводиться поняття про рівень грозоміцності. Рівень грозоміцності оцінюється максимальною амплітудою струму блискавки I_0 і його крутістю a , при яких ще не відбувається руйнація ізоляції лінії (крутість $a = I_0/t_\phi$, де t_ϕ – тривалість фронту хвилі струму).

Показником грозоміцності вважають імовірну кількість років роботи установки без грозових відключень

$$M=1/N_{\text{відкл}}$$

де M – кількість років роботи без грозових відключень; $N_{\text{відкл}}$ – очікувана кількість випадків виникнення небезпечних грозових перенапруг у рік.

Наприклад, для ВЛ

$$N_{\text{відкл}} = 0,9h \times 10^{-3} \times L \times n_{\text{д}} \times v_{\text{пер}} \times \eta,$$

де h – середня висота підвісу троса або проводу; L – довжина лінії; $n_{\text{д}}$ – кількість грозових днів у році; $v_{\text{пер}}$ – імовірність перекриття ізоляції ВЛ при ударі блискавки; η – імовірність переходу імпульсного перекриття в силову дугу.

Аналогічно підраховується й грозоміцність інших об'єктів (підстанцій).

4.4. Засоби захисту від перенапруг

У мережах до 35 кВ часто для захисту використовують відкриті розрядні проміжки – захисні розрядники ("рога") і трубчасті розрядники. Спрацьовування таких розрядників викликає різкий спад напруги, виникнення перехідних процесів і небезпечних перенапруг на поздовжній ізоляції високовольтних пристроїв (трансформатори, генератори, реактори і т.д.). Крім цього, такі розрядники мають круту вольт-секундну характеристику (ВСХ), тому що форма електричного поля різко неоднорідна. Це не дозволяє здійснювати захист об'єктів в області коротких часів впливу напруги (грозові перенапруги) (рис 4.6).

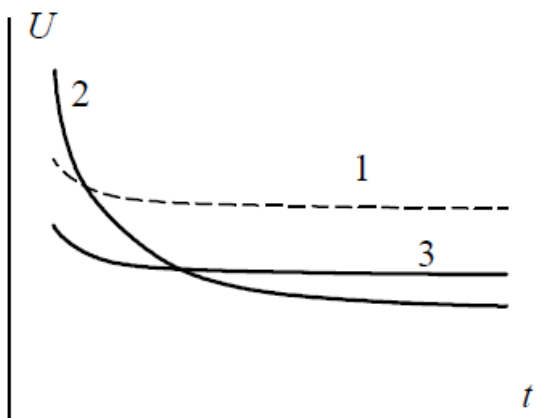


Рис. 4.6. Вольт-секундна характеристика: Ізоляції що підлягає захисту (1), іскрового проміжку з різко неоднорідним полем (2) і однорідним полем (3)

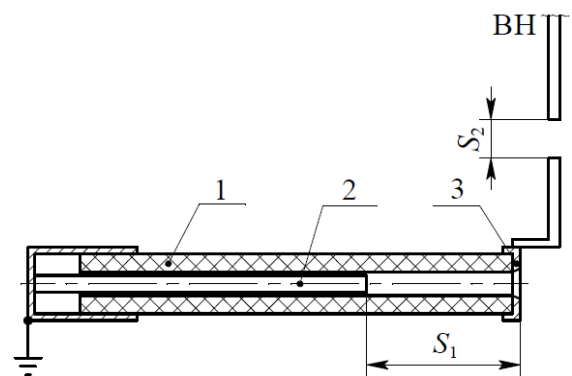


Рис. 4.7. Пристрій трубчастого розрядника: S_1 – основний проміжок; S_2 – зовнішній іскровий проміжок; 1 – діелектрична труба; 2 – стрижневий електрод; 3 – відкритий електрод

Одним із кращих розрядників такого типу є трубчастий розрядник (РТ) (рис. 4.7). Електроди іскрового проміжку поміщаються в діелектричну трубу 1 з газогенеруючого матеріалу (наприклад вініпласт).

Основний проміжок – S_1 забезпечує дугогасіння. Проміжок S_2 служить для відділення газогенеруючої трубки від мережі, щоб уникнути її розкладання від струмів витоку. З появою перенапруг пробивається S_1 і S_2 . Через них протікає імпульсний струм і супровідний струм промислової частоти. Температура підвищується, відбувається інтенсивне газовиділення. Тиск підвищується до десятків атмосфер. Газ виходить через відкритий електрод 3. Створюється поздовжнє дуття. Дуга видувається назовні. При переході струму через 0 дуга гасне. Через недоліки (див. ВСХ) РТ не застосовуються для захисту відповідального устаткування.

Найширше застосування в мережах високої напруги одержали вентильні розрядники (РВ), які мають пологу ВСХ. Вони складаються з декількох іскрових проміжків (ІП), під'єднаних послідовно, послідовних нелінійних робочих опорів (НО) і шунтувальних опорів ($R_{ш}$).

ІП служать для відділення НО від постійного впливу робочої напруги й струму, що протікає через нього та руйнує НО. НО служить для обмеження супровідного струму до величини, необхідної для гасіння дуги. $R_{ш}$ служить для вирівнювання розподілу напруги за елементарними розрядними проміжками з метою виключення помилкового спрацьовування розрядника. РВ обмежує перенапруги й гасить дугу супровідного струму без вимкнення мережі або підстанції.

Після гасіння дуги розрядник повертається у вихідний стан і готовий до повторної роботи. Кількість спрацьовувань РВ дорівнює 20 або 50. У найпростіших РВ (типу РВС, РВП) струм гасіння дуги становить 80 А. Більш сучасні РВ мають струм гасіння дуги 250 А.

Матеріалами НС є віліт і тервіт. Вольт-амперна характеристика їх описується виразом

$$U = K \times I^\alpha,$$

де α – коефіцієнт вентильності; K – стала.

Для віліту $\alpha = 0,11 \div 0,2$; для тервіту $\alpha = 0,15 \div 0,25$.

РВ поділяються на 4 групи. Найкращі захисні властивості мають РВ I групи, але вони найдорожчі.

IV група – РВП (підстанційні),

III група – РВС (станційні),

II група – РВМ (магнітовентильні), РВМГ (магнітовентильні, грозові),

I група – РВТ (струмообмежуючі) РВРД (з дугою, що розтягується).

Істотного поліпшення захисних характеристик можна досягнути при відмові від використання ІІІ. Для цього потрібні матеріали з різко нелінійною ВАХ. Цим вимогам відповідає матеріал на основі оксиду цинку, з якого виготовляють нелінійні резистори – варистори. Захисні пристрої на їх основі називаються нелійними обмежувачами перенапруг (ОПН). Коефіцієнт нелінійності ОПН становить $\alpha = 0,02 \div 0,1$. ОПН збираються з окремих дисків (варисторів), які поміщаються в герметичний порцеляновий корпус.

ОПН під'єднуються безпосередньо до мережі й заземлюються через реєстратор спрацьовувань. Малий коефіцієнт нелінійності ОПН дозволяє суттєво обмежувати перенапруги й застосовувати їх у мережах надвисокого й ультрависокого класів напруг.

4.5. Хвильові процеси у лініях

При ПУБ у лінію або поблизу її в землю виникають електромагнітні хвилі, що поширюються уздовж проводів ЛЕП. Атмосферні перенапруги на лініях і підстанціях визначаються рухом і заломленням цих хвиль. Тому аналіз хвильових процесів при розрахунках пристроїв грозозахисту має принципово важливе значення.

Хвиля поширюється уздовж лінії в повітрі зі швидкістю $v = C / (\mu \times \epsilon)^{1/2}$, де $C = 300$ м/мкс – швидкість світла; μ – відносна магнітна проникність середовища; ϵ – діелектрична постійна.

Для повітря $\mu_0 = 1$; $\epsilon = 1$.

Для кабельних ліній $\mu_0 = 1$; $\epsilon \approx 4$.

Отже, у кабелях $v \approx 0,5 C$.

Напруга й струм хвилі зв'язані між собою

$$\frac{U}{I} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = Z \quad (4.4)$$

де Z – хвильовий опір. Хвильовий опір одиничного проводу ВЛ $Z=400\div 450$ Ом. Кабельні лінії мають $Z=50\div 100$ Ом. У загальному випадку хвильовий процес у лініях визначається чотирма основними параметрами: ємністю C , індуктивністю L , активним опором проводу і активною провідністю діелектрика.

4.5.1. Заломлення й відбивання хвиль у вузлових точках

Вузловою точкою лінії називають таку точку, в якій стрибком змінюється співвідношення між електричним і магнітним полями, тобто змінюється хвильовий опір лінії Z_L .

Для розрахунку заломлених і відбитих хвиль у вузлових точках використовують еквівалентну схему заміщення лінії з розподіленими параметрами на лінію із зосередженими параметрами за правилом Петерсена (рис. 4.8).

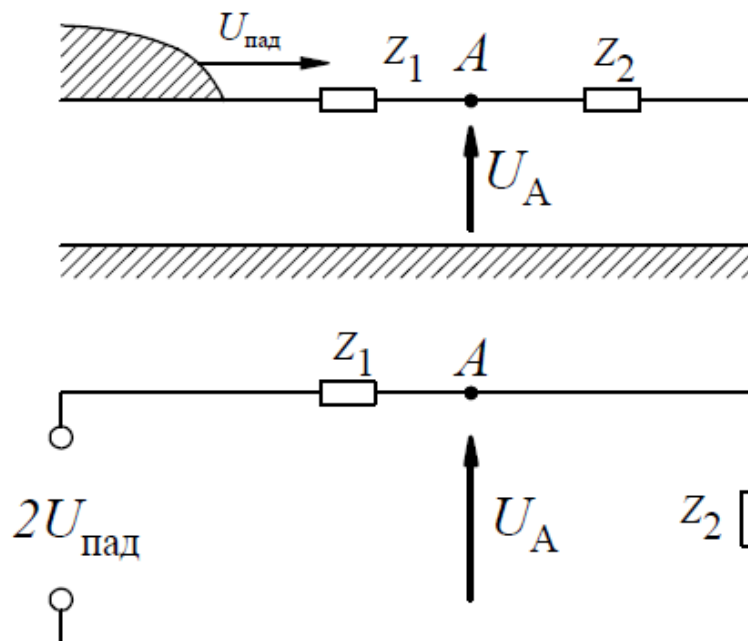


Рис. 4.8. Еквівалентна схема заміщення довгої лінії за правилом Петерсена для розрахунку заломлених і відбитих хвиль у вузловій точці А: $U_{\text{пад}}$ – падаюча хвиля напруги; Z_1 – хвильовий опір довгої лінії, по якій падає хвиля напруги; Z_2 – хвильовий опір довгої лінії після точки неоднорідності; А – вузлова точка (місце неоднорідності); U_A – напруга у вузловій точці

Розглянемо кілька прикладів відбивання й заломлення хвиль у вузлових точках при нескінченній падаючій хвилі із прямокутним фронтом.

1. Кінець лінії (точка А) розімкнений, $Z_2 = \infty$.

$$U_A = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot U_{\text{пад}} = 2U_{\text{пад}}. \quad (4.5)$$

Падаюча хвиля напруги відбивається повністю з тим же знаком і в точці А, на кінці лінії, напруга подвоюється.

Для хвилі струму $i_2 = 0$, тобто заломлений струм дорівнює нулю.

$$i_{\text{від}} = \frac{U_0}{Z_1} = -\frac{U_n}{Z_1} = -i_n \quad (4.6)$$

Падаюча хвиля струму відбивається від розімкненого кінця повністю зі зворотним знаком і струм у лінії дорівнює нулю.

2. Лінія наприкінці (точка А) замкнена, $Z_2 = 0$

Падаюча хвиля напруги відбивається повністю від короткозамкненого кінця лінії зі зворотним знаком, напруга в точці А дорівнює нулю, а хвиля струму відбивається з тим же знаком – подвоюється.

3. Лінія наприкінці (точка А) узгоджена, тобто $Z_1 = Z_2 = Z$.

У цьому випадку падаючі хвилі напруги і струму не відбиваються і не заломлюються при падінні на узгоджене Z .

Для системи (рис. 4.8)

$$\begin{cases} U_{\text{зал}} = U_{\text{пад}} + U_{\text{від}} \\ i_{\text{зал}} = i_{\text{пад}} - i_{\text{від}} \end{cases} \quad (4.7)$$

$$i_{\text{пад}} = \frac{U_{\text{пад}}}{Z_1}; \quad -i_{\text{від}} = \frac{U_{\text{від}}}{Z_1}; \quad i_{\text{зал}} = \frac{U_{\text{зал}}}{Z_2}. \quad (4.8)$$

Визначимо $U_{\text{зал}}$ і $U_{\text{від}}$ через $U_{\text{пад}}$.

Вирішуючи спільно (4.7), (4.8), маємо:

$$U_{\text{зал}} = U_{\text{пад}} \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = \alpha U_{\text{пад}}, \quad (4.9)$$

$$U_{\text{від}} = U_{\text{пад}} \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} = \beta U_{\text{пад}}; \quad (4.10)$$

де

$$\alpha = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}; \quad (4.11)$$

$$\beta = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}, \quad (4.12)$$

де α – коефіцієнт заломлення; β – коефіцієнт відбивання.

Звідси рівняння в (4.7) запишеться так:

$$\alpha U_{\text{пад}} = U_{\text{пад}} + \beta U_{\text{пад}}. \quad (4.13)$$

де $\alpha - \beta = 1$.

Визначимо межі зміни α і β .

1. Припустимо, що $Z_2 = 0$, тоді з виразу (4.11) $\alpha = 0$. При $Z_2 = \infty$ $\alpha = 2$. Отже, α змінюється в діапазоні $0 \leq \alpha \leq 2$.

2. Припустимо, що $Z_2 = 0$, тоді з виразу (4.12) $\beta = -1$. При $Z_2 = \infty$ $\beta = 1$. Отже, β змінюється в діапазоні $-1 \leq \beta \leq +1$.

4.5.2. Перенапруги при несиметричному вимкненні фаз

При несиметричному вимкненні фаз лінії електропередач, коли вимикаються одна або дві фази лінії, можливе виникнення резонансних перенапруг (ферорезонанс). Такі випадки можуть мати місце при: обриві одного проводу на лінії; перегорянні плавких вставок; однофазному або двофазному к.з.; неодночасному вимкненні фаз вимикача, що може мати місце при пофазному керуванні вимикачами і т.д.

У мережах з ізольованою нейтраллю при несиметричних комутаціях можуть утворитися резонансні контури, якщо до лінії під'єднані на холостому ході або мало навантажені трансформатори.

У таких контурах і виникають ферорезонансні (ФР) перенапруги. Розглянемо загальну схему, в якій можливе виникнення ФР перенапруг (рис. 4.9). Ключем P_A умовно зображено місце розриву фази А, а також показані ємності фаз між собою (C'_{12}) і на землю (C'_0) до розриву (до ключа P_A) і відповідні ємності C_{12} і C_0 після розриву.

Нейтраль системи – джерела може бути заземлена або ізольована (ключ P_H). А нейтраль трансформатора навантаження повинна бути ізольована. Це характерно для всіх ліній, аж до

110 кВ включно. (При заземленій нейтралі навантаження ферорезонанс не виникає).

Вважатимемо, що у фазі А обірвався провід й упав на землю, тобто розімкнемо ключ P_A й заземлимо фазу А з боку системи ключем P . Тоді схема заміщення буде як на рис. 4.10, де трикутник ємностей C_{12} замінений на відповідну йому еквівалентну зірку, а трикутником ємностей C'_{12} можна знехтувати, тому що вони не впливають на розглянуті процеси.

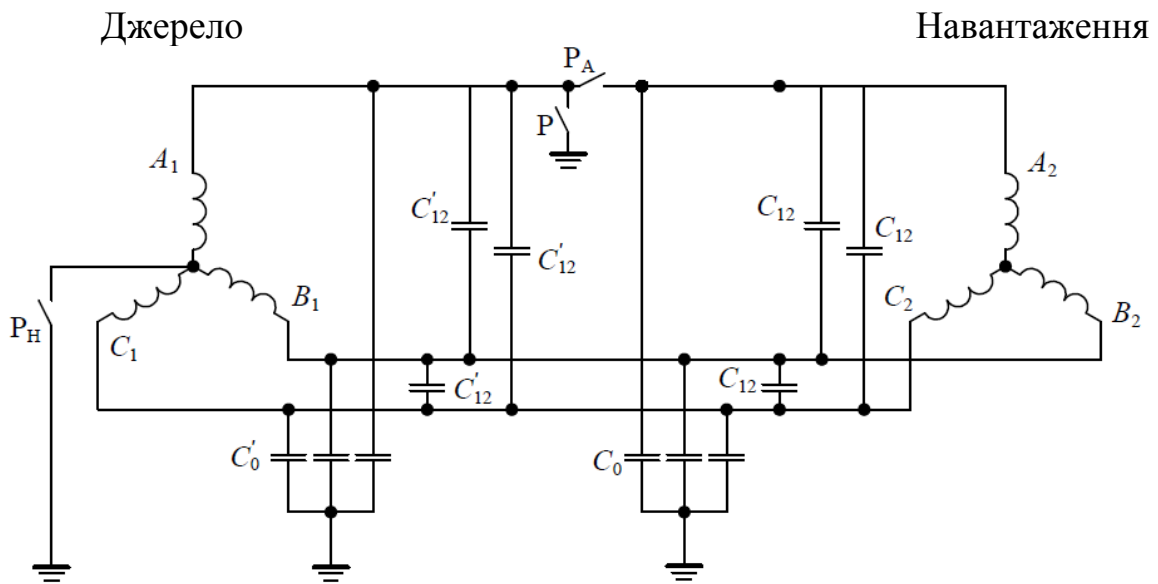


Рис. 4.9. Схема для дослідження перенапруг при несиметричному відімкненні фаз: A_1, B_1, C_1 – фази джерела; A_2, B_2, C_2 – фази навантаження – трансформатора з ізолюваною нейтраллю; C'_{12} – міжфазні ємності системи до ключа P_A ; C'_{12} – міжфазні ємності системи до ключа P_A ; C_{12} – міжфазні ємності навантаження; C_0 – ємності фаз навантаження; P, P_A, P_H – ключі

Струм I_1 у фазі А після обриву проводу буде йти на землю через місце заземлення, а потім через ємність C_0 буде повертатися знову на провід до навантаження. Тут він розгалужується: частина струму тече через ємність C_{12} , а інша частина через обмотки (індуктивності) L_T трансформатора.

Весь струм замикається через фази B_1 і C_1 джерела. Потенціали нульових точок трансформатора навантаження й зірки міжфазних ємностей C_{12} однакові. Перенапруги виникають завдяки проходженню струму через послідовно з'єднані ємності C_0 і індуктивність $1,5 L_T$ – коливальний контур. Тут виникає

необхідність визначити величини напруг на ємності й індуктивності. Рівняння (4.12) може бути розв'язане графічно (рис. 4.12). Тому схему (рис. 4.10) можна перетворити в однофазну (рис. 4.11). Відповідно до цієї схеми

$$U_{\text{екв}} = 1,5U_L + U_{C0}$$

або

$$U_{\text{екв}} = 1,5U_{\phi} = 1,5U_L - U_{C0} \quad (4.12)$$

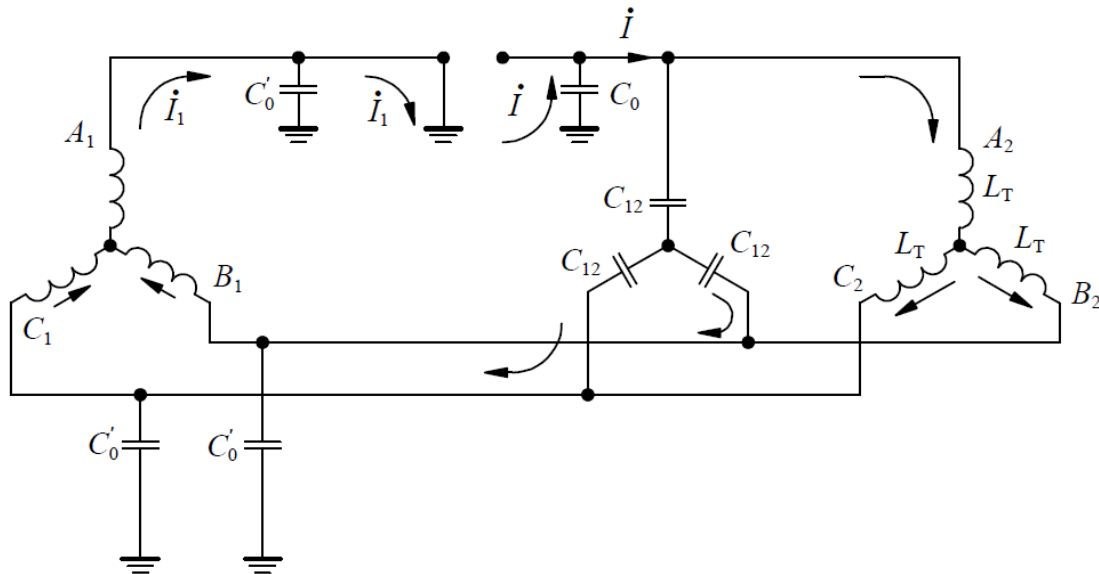


Рис. 4.10. Схема заміщення з несиметричною комутацією (один провід заземлений)

Як бачимо (рис. 4.12) для схеми (рис. 4.11) можливі три режими, що відповідають точкам *a*, *б*, *в*. Два із цих режимів (точки *a* й *б*) є індуктивними, а один (точка *в*) – ємнісний. Стійкими є тільки два режими – точки *a* і *б*. Режим у точці *в* нестійкий і обов'язково переходить або в точку *б*, або в точку *a*. Якщо у схемі переважає індуктивний режим, то система повернеться в точку *б* і перенапруг не виникне. Якщо переважає ємнісний режим, то виникає гармонічний резонанс (ферорезонанс), що приводить до значних перенапруг (рис. 4.12), у 3 рази й більше. Крім цього, на трансформаторі навантаження змінюється порядок чергування фаз на зворотний – «перекидання» фаз. При цьому, якщо трансформатор мав моторне навантаження, то після обриву проводу (або

неодночасної комутації вимикачів) напрямок обертання двигунів зміниться на зворотний.

Найбільш радикальним засобом, що усуває подібні явища,

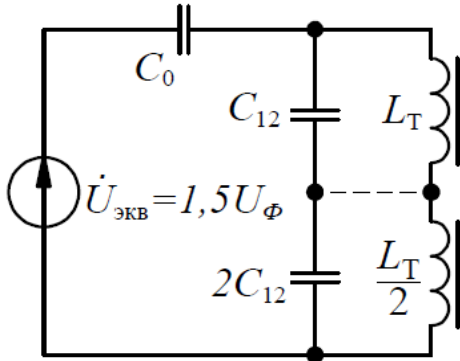


Рис. 4.11. Однофазна схема заміщення для схеми рис. 4.10

може бути заземлення нейтралі трансформатора навантаження. Однак ця вимога не завжди здійснена навіть для систем 110 кВ.

Тому необхідно прагнути до зменшення ймовірності несиметричних вимкнень (відмова від плавких запобіжників і вимикачів із пофазним керуванням, не слід

довгостроково залишати увімкненими холості або слабо навантажені трансформатори).

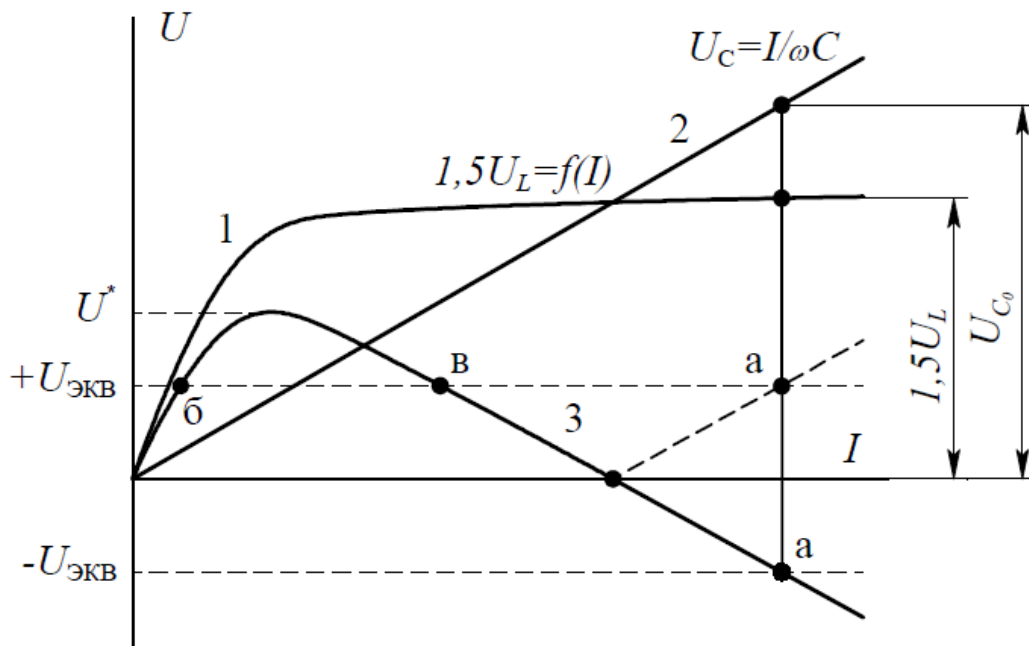


Рис. 4.12. Графічне рішення рівняння для коливального контуру з нелінійною індуктивністю: 1 – зміна напруги на нелінійній індуктивності (обмотці трансформатора); 2 – зміна напруги на ємності; 3 – сумарна зміна напруги в контурі

4.6. Хвильові процеси в обмотках трансформаторів

Хвилі грозового (і комутаційного) характеру, що набігають по лінії електропередачі на підстанцію, приводять до виникнення імпульсних напруг, що впливають на обмотку трансформатора (двигуна, генератора та ін.). Характер пробивів ізоляції обмоток вказує на важливу роль хвильових процесів.

У трансформаторі під дією імпульсу напруги виникає складний електромагнітний процес, що приводить до перенапруг між котушками (витками) – поздовжня ізоляція, і між обмотками й заземленими частинами – головна ізоляція. Сумарна довжина проводів в обмотках трансформаторів високої напруги досягає декількох кілометрів (довга лінія). При впливі імпульсної напруги в обмотці виникають хвильові процеси, що мають деяку аналогію із процесами у лініях електропередачі. Однак схема заміщення обмотки трансформатора, навіть без урахування активного опору й провідності, значно складніша, ніж схеми заміщення лінії (рис. 4.13).

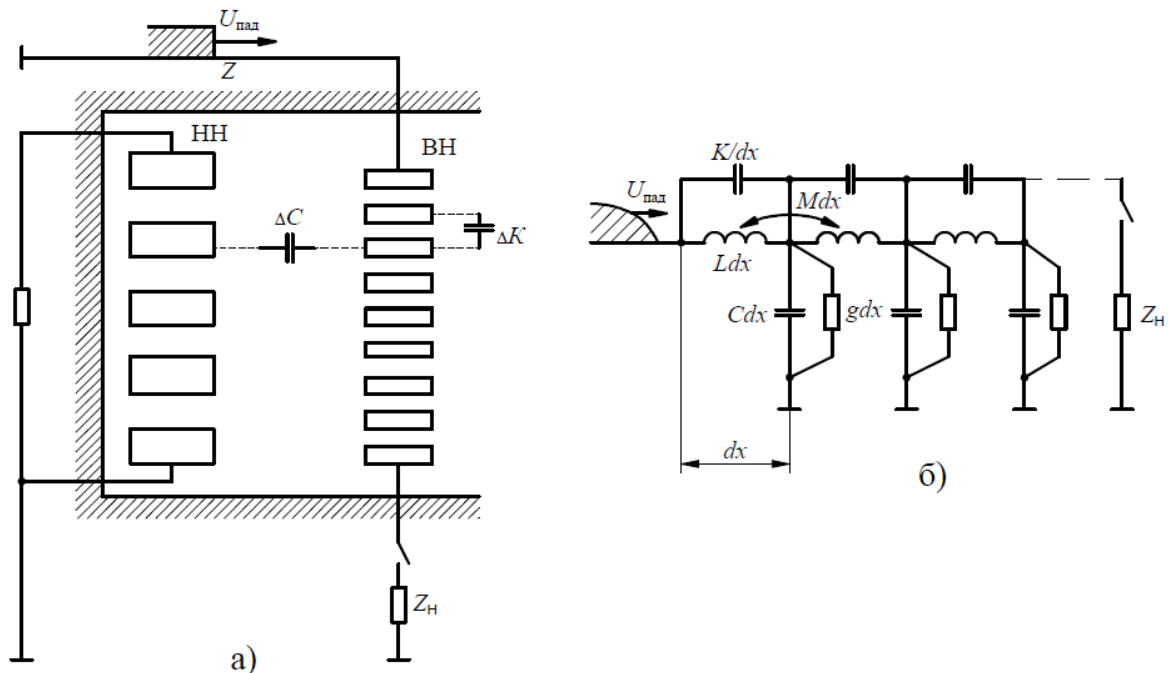


Рис. 4.13. Конструктивна схема однофазної котушкової обмотки (а) і електрична схема заміщення (б) високовольтного трансформатора: Z_n – опір нейтралі трансформатора

Через те, що провід обмотки намотується навколо магнітопроводу, з'являються два додаткових параметри схеми

заміщення: ємність між сусідніми витками або котушками K (поздовжня ємність) і взаємна індуктивність $M(x)$ кожного витка з усіма іншими витками обмотки. Величини L , C , K – середні значення індуктивності, ємності щодо заземлених елементів і сусідніх обмоток і поздовжньої ємності на одиницю довжини обмотки.

У зв'язку із цим обмежимося якісним розглядом процесів у трансформаторах. Електромагнітний перехідний процес у трансформаторі залежить від ряду факторів:

- схеми з'єднання обмоток;
- режиму нейтралі (заземлена або ізольована);
- конструкції обмоток;
- падіння хвилі по одній, двох, трьох фазах ЛЕП.

Спочатку розглянемо основні закономірності перехідного процесу для однофазного трансформатора з котушковою обмоткою. На обмотку ВН впливає прямокутна нескінченно довга хвиля напруги. Весь процес впливу хвилі складається із трьох стадій:

- а) початковий процес (діє фронт хвилі) $t = 0$;
- б) сталий режим (перехідні процеси закінчилися) $t = \infty$;
- в) перехідний процес (вільні коливання) $0 < t < \infty$.

4.6.1. Початковий розподіл напруги уздовж обмотки трансформаторів

У початковий момент ($t = 0$), коли впливає фронт хвилі напруги (крутість фронту велика, що еквівалентно високій частоті), індуктивність обмотки не пропускає струм. Отже, струм буде протікати тільки по ємностях C і K і схема заміщення набуде вигляду (рис. 4.14, а).

Для цієї початкової стадії розподіл напруги уздовж обмотки трансформатора запишеться у вигляді

$$U_{\text{нач}} = U_{\text{пад}} e^{-\alpha l \left(\frac{x}{l} \right)},$$

де l – довжина обмотки.

З формули видно велику роль параметра

$$\alpha l = \sqrt{\frac{C_{\text{обм}}}{L_{\text{обм}}}},$$

де $C_{\text{обм}}$ – ємність обмотки між початком і кінцем; $L_{\text{обм}}$ – індуктивність обмотки між початком і кінцем.

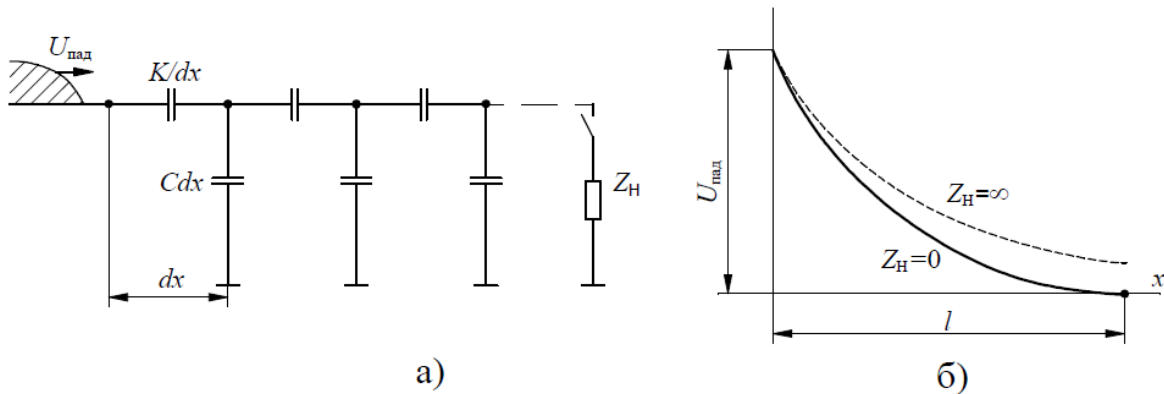


Рис. 4.14. Початковий розподіл напруги по обмотці трансформатора: а) – електрична схема заміщення для початкового процесу ($t=0$); б) – розподіл напруги уздовж обмотки для $t=0$

Для сучасних трансформаторів $5 < \alpha l \leq 10$. На значній частині обмотки розподіл напруги буде однаковий як для режиму заземленої нейтралі $Z_H = 0$, так і з ізольованої нейтралі $Z_H = \infty$ (рис. 4.14, б).

У режимі із заземленою нейтраллю кінець обмотки буде мати потенціал, що дорівнює 0. У режимі з ізольованою нейтраллю кінець обмотки буде мати ємність C_{dx} щодо землі (див. схему заміщення), на якій буде спад напруги ΔU . У початковому режимі основний спад напруги на початку обмотки через нерівномірний розподіл напруги. У зв'язку із цим ізоляція перших витків або котушок робиться посиленою.

4.6.2. Сталій режим (або вимушений режим)

Для імпульсної прямокутної хвилі напруги цей режим відповідає тривалому часу прикладення напруги $t \rightarrow \infty$. Через обмотку протікає "наскрізний" вимушений струм $i_{\text{пр}}$. Ємнісні струми дорівнюють нулю, тому що ємності вже зарядилися. Схема заміщення представлена тільки індуктивними елементами (рис. 4.15).

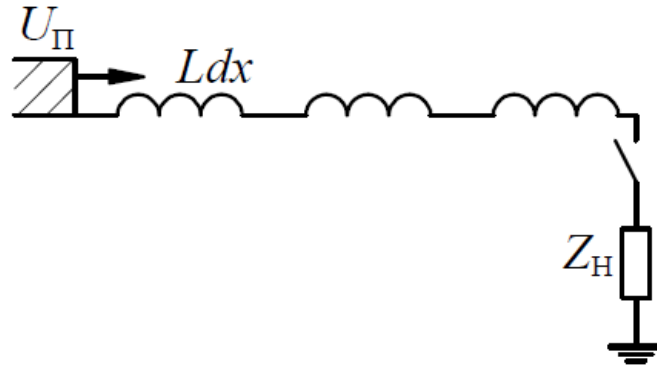


Рис. 4.15. Схема заміщення обмотки трансформатора в сталому режимі

Оскільки обмотка однорідна, то розподіл напруги по котушках (витках) буде рівномірним, але залежить від режиму нейтралі. У випадку заземленої нейтралі вимушена напруга $U_{\text{вим}}$ рівномірно спадає до нуля (рис. 4.15, а) і може бути записана рівнянням

$$U_{\text{вим}(x)} = U_{\text{пад}}(1-x/l).$$

Для ізолюваної нейтралі струм через обмотку не тече $i_{\text{вим}}=0$. Отже, $U_{\text{вим}}$ на початку й кінці обмотки однакові (рис. 4.16, б). $U_{\text{вим}} = U_{\text{пад}}$. Звідси випливає, що у випадку з ізолюваною нейтраллю кінець обмотки повинен мати таку ж ізоляцію, як і початок.

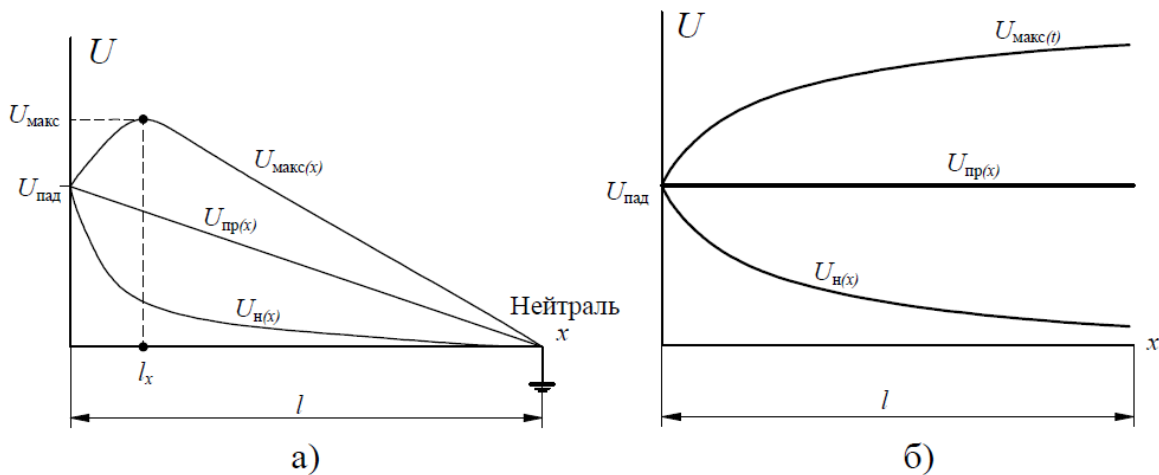


Рис. 4.16. Розподіл напруги уздовж обмотки трансформатора в різних стадіях: а) опір нейтралі дорівнює нулю; б) опір нейтралі дорівнює нескінченності

4.6.3. Перехідний процес

З рис. 4.16 випливає невідповідність між початковим і сталим режимами в обмотці трансформатора. Це приводить до виникнення перехідного процесу, де віссю коливань є пряма сталого режиму. Схема заміщення подана на рис. 4.13, б, де кожна комірка L , C , K це коливальний контур із власною частотою коливань від ω_1 до ω_∞ . При цьому в обмотці можуть бути досягнуті максимальні потенціали, більші за $U_{\text{пад}}$.

$$U_{\text{max}} = U_{\text{пр}(x)} + \sum_{k=1}^n U_{k(x)},$$

де $U_{k(x)}$ – вільна складова коливань, що є сумою ординат (амплітуд) усіх гармонік у даній точці обмотки.

Максимальні потенціали уздовж обмотки описуються огинаючою максимальних потенціалів. Величина U_{max} залежить від режиму нейтралі. При заземленій нейтралі $U_{\text{max}} \leq (1,2-1,3) U_{\text{пад}}$ і потрапляє на початкові витки обмотки (рис. 4.16, а). При ізольованій нейтралі в перехідному режимі $U_{\text{max}} \leq 2U_{\text{пад}}$ і потрапляє на кінець обмотки (рис. 4.16, б).

Перенапруги в перехідному режимі небезпечні для головної ізоляції. Тому головна ізоляція трансформатора повинна бути посилена:

- для заземленої нейтралі в початковій частині обмотки ($1/3$ від початку обмотки);
- для ізольованої нейтралі посилення необхідно робити по всій довжині, але особливо наприкінці обмотки.

4.6.4. Розподіл напруги уздовж обмоток трифазного трансформатора

Імпульсні перенапруги впливають на трансформатор, як правило, з боку високої напруги, При цьому хвиля перенапруги може приходити як із ВЛ, так і по кабельній вставці. Розподіл напруги по обмотці три фазного трансформатора залежить від:

- схеми з'єднань обмоток;
- режиму нейтралі.

Обмотки трансформатора з високої сторони для імпульсного впливу навантажені на повітряну ЛЕП або на кабель. Хвильовий опір повітряної лінії залежно від конструкції й класу

напруги становить $Z_L = 250 \div 500$ Ом. Хвильовий опір кабелю $Z_K = 50 \div 100 \div 150$ Ом. Хвильовий опір обмоток трансформатора $Z_{TR} = 10$ кОм, тобто трансформатор навантажений на малий опір порівняно із власним. Для спрощення можна представити, що обмотки, по яких не приходять хвилі перенапруги, закорочені. Розглянемо різні схеми з'єднань (рис. 4.17).

4.6.4.1. Зірка із заземленою нейтраллю

Хвиля перенапруги приходить по одній фазі А (рис. 4.17, а). Розподіл напруги уздовж обмотки такий самий, як у випадку однообмоткового трансформатора із заземленою нейтраллю (рис. 4.16, а). Те ж саме відбувається при впливі перенапруги по двох і трьох фазах одночасно.

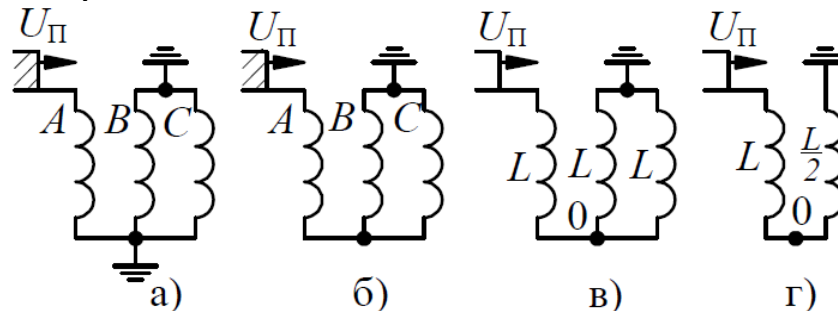


Рис. 4.17. Еквівалентні схеми заміщення для аналізу перенапруг в обмотках трансформаторів: а – "зірка" із заземленою нейтраллю; б – "зірка" з ізолюваною нейтраллю; в, г – схема заміщення для "зірки" з ізолюваною нейтраллю

4.6.4.2. Зірка з ізолюваною нейтраллю

Загальний метод розрахунку перехідного процесу залишається таким самим: визначаються криві первісного й сталого розподілу потенціалів по обмотках і за різницею цих кривих обчислюються складові вільного режиму. Можливо два випадки: падіння хвилі на одну фазу (рис. 4.17, б) і падіння хвилі на дві фази одночасно. У першому випадку хвиля падає на фазу А, дві інші фази заземлені, маємо модифікацію схеми (рис. 4.17, в, г). Розподіл напруги падаючої хвилі по високовольтних обмотках трансформатора зображено на рис. 4.18.

Сталий розподіл $U_{ПР}$ має злам у точці з'єднання обмоток (нейтралі), оскільки індуктивний опір двох паралельно

з'єднаних обмоток В і С удвічі менший, ніж опір обмотки А. Потенціал нейтралі в перехідному режимі $U_{\text{МАКС}}$ не перевищує $2/3 U_{\text{пад}}$.

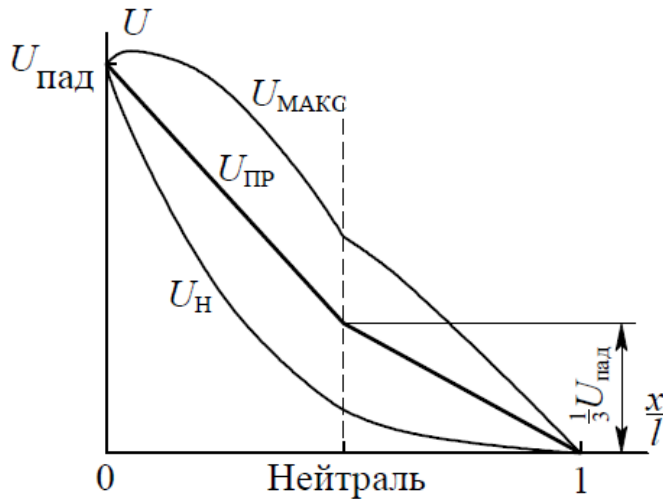


Рис. 4.18. Розподіл напруги по високовольтних обмотках трифазного трансформатора при падінні хвилі по фазі А: $U_{\text{Н}}$ – початковий розподіл падаючої напруги уздовж обмоток; $U_{\text{ВИМ}}$ – вимушений розподіл напруги; $U_{\text{МАКС}}$ – огинаюча перехідної напруги

У випадку падіння хвилі по двох фазах (рис. 4.19, а) схема заміщення набуде вигляд (рис. 4.19, б). Розподіл напруги уздовж обмотки трансформатора зображений на рис. 4.20.

Потенціал нейтралі може перевищувати $U_{\text{пад}}$ у перехідному режимі. Виникає небезпека перенапруги для головної ізоляції в області нейтралі.

При падінні хвиль по трьох фазах на три обмотки трансформатора режими розподілу напруги по обмотках такі ж, як для однообмоткового трансформатора з ізольованою нейтраллю (рис. 4.16, б).

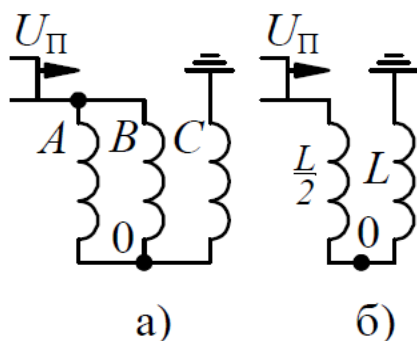


Рис. 4.19. Еквівалентні схеми заміщення для аналізу перенапруг в обмотках трансформаторів при падінні хвиль по двох фазах: а – "зірка" з ізольованою нейтраллю; б – еквівалентна схема заміщення

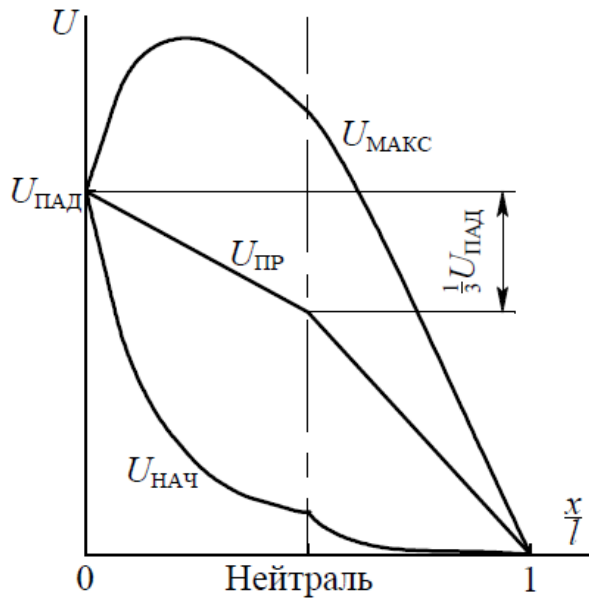


Рис. 4.20. Розподіл напруги по високівольтних обмотках трифазного трансформатора при падінні хвилі по двох фазах A і B : U_H – початковий розподіл падаючої напруги уздовж обмоток; $U_{\text{вим}}$ – вимушений розподіл напруги; $U_{\text{МАКС}}$ – огинаюча перехідної напруги

4.6.4.3. З'єднання обмоток трикутником

Розглянемо схему заміщення для трансформатора з обмотками, з'єднаними в трикутник (рис. 4.21, а). При падінні хвилі на обмотку по фазі A , можна вважати, що при цьому фази C і B заземлені. У цьому випадку процес в обмотці AC такий же, як в обмотці AB , тобто як для однофазного трансформатора із заземленою нейтраллю (рис. 4.16, а).

Падіння хвиль по двох фазах A і B приводить до того, що в обмотках AC і BC розподіл спаду напруги у всіх режимах однаковий і відповідає режиму однофазного трансформатора із заземленою нейтраллю (рис. 4.16, а). Розподіл напруги в обмотці AB можна визначити методом накладання (рис. 4.21, б).

Спочатку визначимо напругу в обмотці AB при падінні хвилі тільки по фазі A . Точка B може вважатися заземленою. Отже, процес розподілу напруги буде як для однофазного трансформатора із заземленою нейтраллю. Потім, визначимо напругу в обмотці BA при падінні хвилі по фазі B . Точку A , можна вважати заземленою. Розподіл такий самий, як і в попередньому випадку.

Підсумовуючи початкові U_H і сталі (вимушені) $U_{\text{вим}}$ розподіли напруги, визначаємо криві відповідно початкового й сталого розподілів в обмотці AB при падінні двох хвиль на неї. За знайденим значенням U_H і $U_{\text{вим}}$ визначаємо криву максимальних перенапруг $U_{\text{МАКС}}$. З рис. 4.21, б видно, що

максимальні напруги, що досягають $2U_{\text{ПАД}}$, виникають всередині обмотки. Отже, тут створюється найбільша небезпека для головної ізоляції.

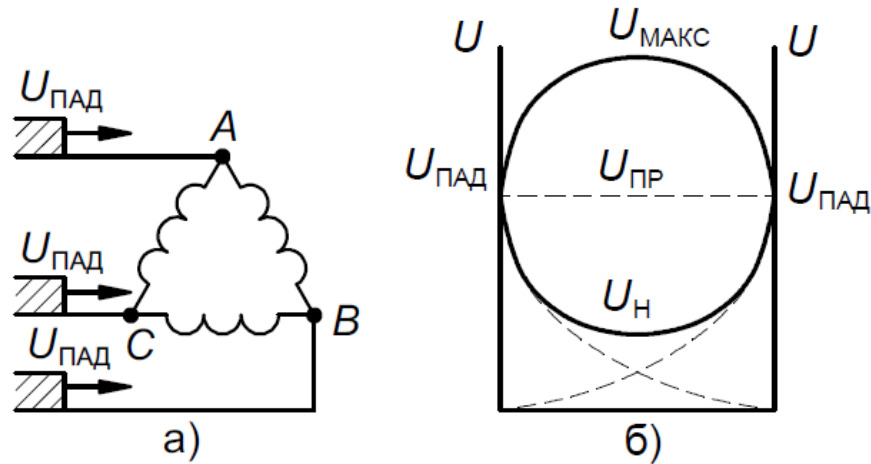


Рис. 4.21. Розподіл потенціалів в обмотці трансформатора, з'єднаного в трикутник при симетричному падінні хвиль: а) – падіння хвиль по трьох фазах обмотки, з'єднаних у трикутник; б) – розподіл напруги в одній з фаз

При падінні хвиль по трьох фазах процеси в кожній фазі будуть аналогічні вищерозглянутим для фази AB .

Для ослаблення ефектів перенапруги й захисту обмоток трансформаторів від пробоя використовуються різні способи введення в конструкцію обмоток спеціальних пристроїв, які істотно знижують перенапруги, що впливають як на головну ізоляцію, так і на поздовжню, (наприклад екрануючі кільця, петльові обмотки, шарові обмотки, екрани).

4.6.5. Передача хвиль перенапруги з однієї обмотки в іншу

При падінні електромагнітної хвилі на одну з обмоток трансформатора електромагнітні процеси в ній збуджують високі потенціали в іншій обмотці. Можливі 2 види передачі ВН.

1. Ємнісна передача потенціалу в трансформаторах (рис. 4.22). Звичайно у високовольтних трансформаторах ємність на землю обмотки високої напруги набагато менша, ніж ємність на землю обмотки низької напруги, тобто $C_{11} \ll C_{22}$.

Еквівалентна схема заміщення (рис. 4.22, б), дозволяє оцінити напругу на вторинній обмотці залежно від напруги хвилі, що надійшла на первинну обмотку:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_{12} + C_{22}}{C_{12}},$$

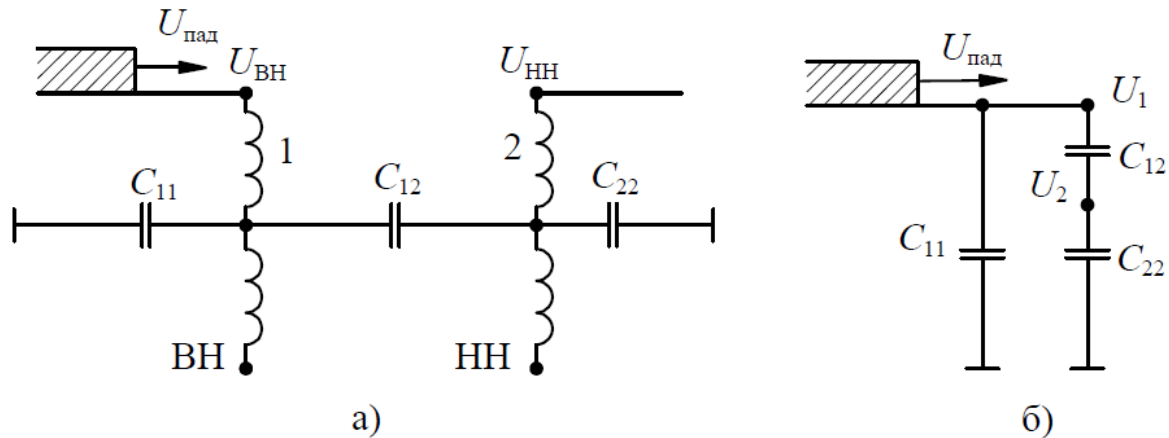


Рис. 4.22. Ємнісна передача електромагнітної хвилі між обмотками трансформатора при надходженні хвилі перенапруги по одній з фаз: а) – загальна схема заміщення; б) – еквівалентна електрична схема для розрахунку

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{22}} = U_1 \cdot \frac{1}{1 + \frac{C_{22}}{C_{12}}}$$

При ємнісній передачі електромагнітної хвилі між обмотками трансформатора коефіцієнт трансформації не відіграє ролі й залежить від C_{22}/C_{12} . Значні потенціали можуть бути на обмотці 2 (НН), тільки коли C_{22} мала.

2. Електромагнітна передача напруги в трансформаторах. Падіння хвилі на обмотку НН зображено на рис. 4.23.

У цьому випадку можливі два варіанти.

а) Якщо фази ВН приєднані до ВЛ, то зростання потенціалу буде незначним як на початку, так і всередині обмотки.

б) Якщо фази АВС від'єднані від ВЛ, то:

$$U_A = U_B = U_C \approx U_{\text{пад}} \times k_{\text{тр}},$$

де $k_{\text{тр}}$ – коефіцієнт трансформації.

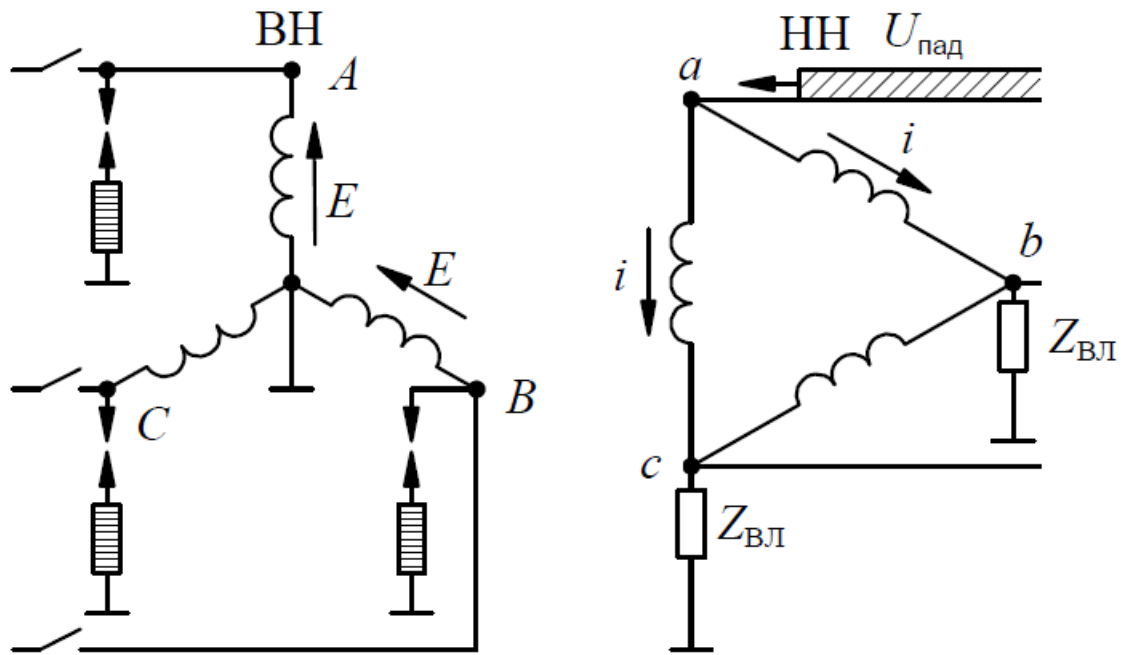


Рис. 4.23. Електромагнітна передача при падінні хвилі перенапруги на обмотку низької напруги

Це небезпечний режим як для внутрішньої, так і для зовнішньої ізоляції трансформатора. Отже, потрібно встановити захисні апарати від перенапруг на виводах трансформатора.

Наприклад: Хвиля перенапруги падає з боку низької напруги, $U_{пад} = 10$ кВ, $k_{тр} = 10/0,4 = 25$. За таких умов $U_A = U_B = U_C \approx U_{пад} \times k_{тр} = 250$ кВ, тобто для трансформатора класу 10 кВ ця напруга в 3 рази вища за імпульсну іспитову напругу (75-80 кВ).

4.7. Перенапруги при вимкненні ненавантажених ЛЕП і батарей конденсаторів

4.7.1. Вимкнення ненавантажених ВЛ

При холостому ході лінії струм випереджає напругу практично на 90° (лінія як ємність). При вимкненні лінії, коли контакти вимикача починають розходитися, між ними загоряється дуга. При проходженні струму через 0 (момент t_0 на рис. 4.24) дуга у вимикачі згасне. Лінія залишається зарядженою. На лінії залишається напруга $+U_\phi$, а напруга джерела продовжує змінюватися по синусоїді. Через півперіод напруга джерела досягає значення $-U_\phi$. Отже, між контактами

вимикача напруга досягає значення $2U_{\phi}$. Міцність проміжку між контактами вимикача за півперіод зростає не більш ніж до $2U_{\phi}$ (повітряні вимикачі) і U_{ϕ} (масляні вимикачі).

Досить імовірним є повторне запалювання дуги у вимикачі в момент t_1 , коли напруга джерела дорівнює $-U_{\phi}$. При цьому лінія буде перезаряджатися від $+U_{\phi}$ до $-U_{\phi}$. І по ній буде поширюватися хвиля напруги $-2U_{\phi}$ і проходити струм $i=-2U_{\phi}/Z$.

Перезарядження ВЛ відбувається в результаті поширення по лінії хвилі із крутим фронтом $-2U_{\phi}$ (компенсація $+U_{\phi}$ і зарядка до $-U_{\phi}$). На кінці розімкненої лінії хвиля $-2U_{\phi}$ відіб'ється з тим же знаком, тобто досягне $-4U_{\phi}$, але результуюча напруга буде $-4U_{\phi}+U_{\phi}=-3U_{\phi}$. Хвиля струму відіб'ється з протилежним знаком (рис. 4.25).

При цьому на лінії буде встановлюватися напруга $-3U_{\phi}$ (рис. 4.24), а сумарний струм на ділянках лінії, де пройшла відбита хвиля, дорівнюватиме нулю. Тому, коли відбита хвиля дійде до джерела (контакти вимикача), струм у вимикачі проходить через 0 і дуга гасне (момент t_2). Цей час пробігу хвилі струму й напруги значно менший за півперіод. Але коли напруга джерела змінюється синусоїдально до $+U_{\phi}$, то між контактами вимикача напруга досягає $4U_{\phi}$. І знову можливе запалювання дуги й т.д.

Якби повторні запалювання дуги тривали необмежено довго, то перенапруги на лінії могли б досягти як завгодно великої величини. Але сучасні вимикачі не дозволяють цього. У переважній більшості випадків при вимкненні холостих ліній відбувається не більше одного повторного запалювання дуги. Тому напруга на лінії у випадку джерела нескінченної потужності не повина перевищувати $3U_{\phi}$.

Оскільки лінії мають значну довжину, необхідно враховувати зниження напруги джерела за час подвійного пробігу хвилі по лінії, а також втрати у лінії.

Ці фактори зменшують можливі амплітуди перенапруг на лінії. Перенапруги при вимкненні холостих ліній для ряду енергетичних систем стають найважливішим видом перенапруг.

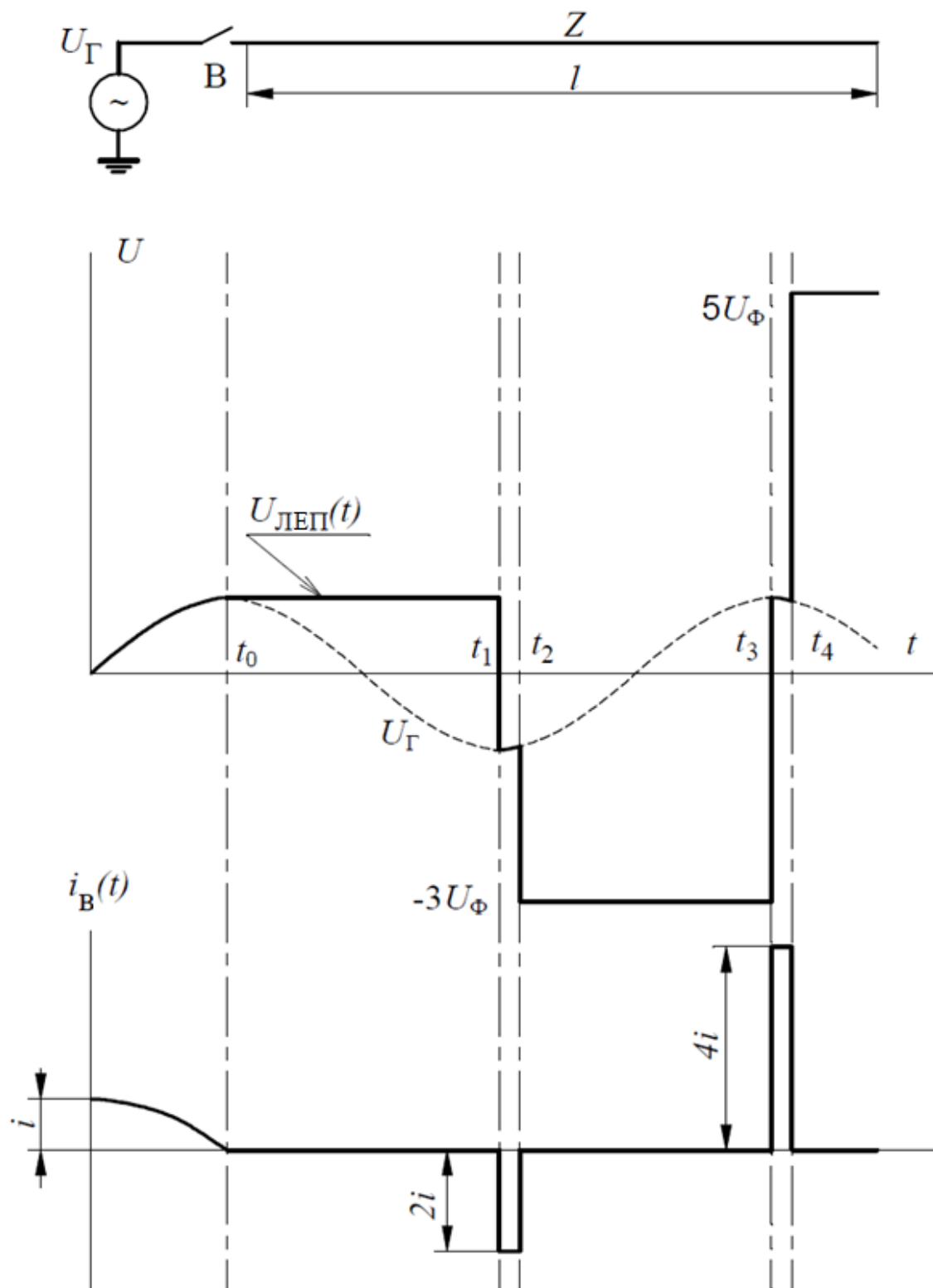


Рис. 4.24. Вимкнення холостої лінії від джерела при наявності повторного запалювання

Можливі види обмеження подібних перенапруг:

Радикальний спосіб – збільшення швидкості відновлення електричної міцності, тобто швидкості розходження контактів вимикача. Однак зі збільшенням швидкодії вимикачів суттєво зростають перенапруги при вимкненні холостих (ненавантажених) трансформаторів.

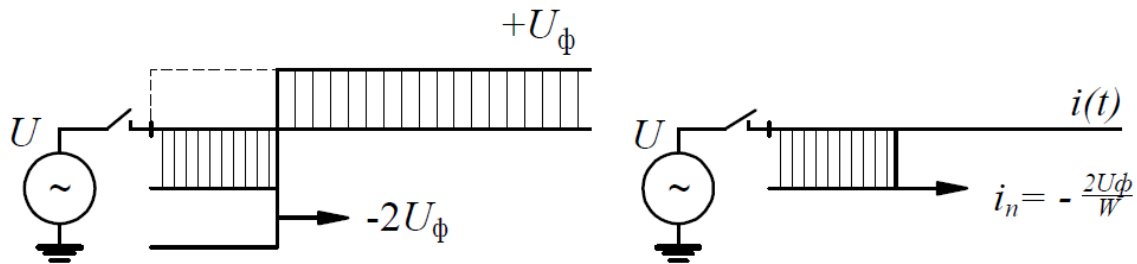


Рис. 4.25. Хвильові процеси при вимкненні холостих ліній

Використання вимикачів із шунтувальними опорами. Недолік – складність конструкції й значна вартість.

Використання вентильних розрядників. Надійно обмежують перенапруги при довжині ліній не більше 200 км. У більш довгих лініях потрібні спеціальні розрядники з підвищеною пропускнуною здатністю по струму.

Приєднання електромагнітних трансформаторів напруги.

4.7.2. Вимкнення батарей конденсаторів

Батареї конденсаторів застосовуються в електричних системах для поліпшення коефіцієнта потужності, регулювання напруги й збільшення пропускнуною здатності довгих ЛЕП.

При вимкненні батарей конденсаторів, так само як і вимкненні холостих ліній, ємнісний струм обривається в момент проходження його через нуль при максимумі напруги на конденсаторі. Через півперіод напруга на контактах вимикача досягає $2U_\phi$, що може викликати повторне запалювання дуги у вимикачі і т.д., як і при вимкненні холостих ліній.

Для обмеження цих напруг тут можуть бути застосовані й застосовуються спеціальні швидкодіючі вимикачі, що не дають повторних запалювань дуги.

4.7.3. Дугогасячі апарати

При замиканні одного з фазних проводів на землю (к. з.) необхідно погасити дугу струму (рис. 4.26).

Одним із найпоширеніших засобів зменшення (компенсації) струму замикання на землю є під'єднання до нейтралі трансформатора регульованого реактора, що називають:

- дугогасячою котушкою;
- котушкою Петерсена (за іменем винахідника);
- налаштованою індуктивністю.

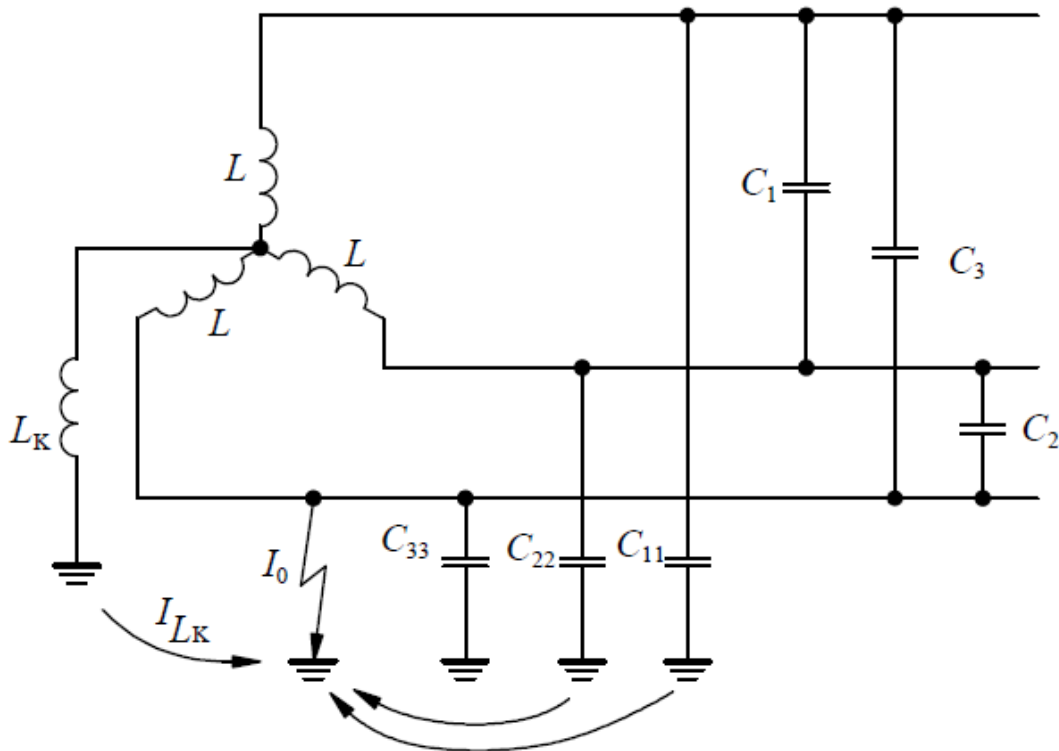


Рис. 4.26. Схема заміщення мережі з дугогасячою котушкою: L_K – індуктивність дугогасячої котушки; L – індуктивність обмотки трансформатора; C_1, C_2, C_3 – ємність фаз лінії між собою – міжфазна ємність; C_{11}, C_{22}, C_{33} – ємність фаз щодо землі; I_0 – струм короткого замикання; I_{L_K} – струм через дугогасячу котушку

При замиканні проводу на землю на нейтралі з'являється напруга відносно землі, що дорівнює фазній напрузі. Тому струм, що протікає через котушку, дорівнює:

$$I_{L_K} = \frac{U_{\Phi}}{\omega L_K},$$

де L_K – індуктивність котушки; ω – кутова частота мережі.

В ідеальному випадку струм у місці замикання проводу на землю дорівнює нулю й дуга гасне. Цього можна досягти, якщо під'єднати до нейтралі джерело (трансформатор) індуктивності такої величини, щоб струм, що протікає через неї, дорівнював за величиною й був зсунутий за фазою на 180° щодо струму в місці замикання на землю. Таке можливо при виконанні рівності

$$3\omega \cdot C_{11} \cdot U_{\Phi} = \frac{U_{\Phi}}{\omega L_K},$$

Звідки

$$\omega L_K = \frac{1}{3\omega C_{11}}.$$

Це умова ідеального настроювання дугогасячої котушки. Звідси можна знайти індуктивність L_K при відомій ємності фази щодо землі C_{11} .

У дійсних (реальних) умовах струм у місці замикання на землю не дорівнює нулю. Його величина зумовлена:

- 1) ступенем розладнання котушки L_K ;
- 2) активними втратами в котушці;
- 3) струмами витоку із проводу на землю;
- 4) вищими гармоніками в ланцюзі розряду.

Заземлення нейтралі через дугогасячу котушку застосовується при струмах замикання на землю більше 10 А в мережах 35 кВ і більше 30 А – в мережах 6 – 10 кВ (усі мережі з ізольованою нейтраллю). При менших струмах дуга замикання на землю звичайно гасне самовільно.

Ступінь розладнання котушки індуктивності звичайно виражають через відношення струмів. Можливі два випадки:

$$\frac{I_0 - I_{L_K}}{I_0} > 0 \quad \text{і} \quad \frac{I_0 - I_{L_K}}{I_0} < 0$$

Якщо відношення більше нуля ($I_0 > I_{L_K}$), то має місце недокомпенсація. Коли відношення менше ($I_0 < I_{L_K}$), має місце перекомпенсація. При рівності $I_0 = I_{L_K}$ досягається повна компенсація (ідеальний випадок). Під'єднання дугогасячої котушки до нейтралі трансформатора при несиметричній системі ємностей $C_{11} \neq C_{22} \neq C_{33}$ приводить до виникнення напруги

на нейтралі трансформатора щодо землі в робочому режимі. Це недолік дугогасячої котушки. Для усунення або зменшення несиметрії ємностей на лінії повинна виконуватися й виконується транспозиція проводів. Дугогасяча котушка має сталеве осердя із зазорами щодо індуктивностей обмотки. Змінюючи величину зазору можна встановлювати (регулювати) бажану вольт-амперну характеристику котушки.

Якщо нейтраль силового трансформатора недоступна, то як дугогасячий апарат застосовують спеціальний дугогасячий трансформатор. Гасіння дуги трансформатором відбувається так само, як і дугогасячою котушкою. Розходження тільки в конструктивному виконанні. Він може бути увімкнений незалежно від з'єднання обмоток силового трансформатора, оскільки під'єднується безпосередньо до збірних шин підстанції.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ:

1. Приведіть класифікацію перенапруг.
2. Які перенапруги відносять до внутрішніх?
3. Які перенапруги відносять до зовнішніх?
4. Які перенапруги відносять до комутаційних?
5. Яким чином будується грозозахист повітряних ЛЕП?
6. Яким чином будується грозозахист підстанцій?
7. Яким чином будується захист від прямих ударів блискавки?
8. Наведіть розрахунки зони захисту стрижневого громовідводу.
9. Наведіть розрахунки зони захисту тросового громовідводу.
10. Наведіть розрахунки грозоємності об'єктів ВЛ.
11. Які засоби захисту від перенапруг?
12. Поясніть процеси заломлення та відбивання хвиль перенапруг у вузлових точках електричних мереж.
13. Яким чином відбуваються перенапруги при несиметричному відключенні фаз?
14. Наведіть розрахунки початкового розподілу напруги вздовж обмотки трансформатора при перенапругах.
15. Наведіть розрахунки усталеного режиму роботи трансформатор при перенапругах.
16. Наведіть розрахунки перехідних процесів у трансформаторах при перенапругах.

17. Наведіть розрахунки розподілу напруги вздовж обмоток трифазного трансформатора при иперенапругах у випадку зірки із заземленою нейтраллю.
18. Наведіть розрахунки розподілу напруги вздовж обмоток трифазного трансформатора при иперенапругах у випадку зірки з ізолюваною нейтраллю.
19. Наведіть розрахунки розподілу напруги вздовж обмоток трифазного трансформатора при иперенапругах у випадку з'єднання обмоток трансформатора трикутником.
20. Поясніть передачу хвиль перенапруг з однієї обмотки трансформатора на іншу.
21. Поясніть процеси що відбуваються при відключенні ненавантажених ВЛ.
22. Поясніть процеси що відбуваються при відключенні батареї конденсаторів
23. Поясніть призначення та принцип дії дугогасячих апаратів.

Список рекомендованої літератури:

1. Техника високих напруг / [И. М. Богатенков, Ю. Н. Бочаров, Н. И. Гумерова, Г. М. Иманов и др.] ; под ред. Г. С. Кучинского. – СПб. : Энергоатомиздат, 2003. – 608 с.
2. Техника высоких напряжений / под ред. Г. С. Кучинского.– СПб. : Изд-во ПЭИПК, 1998. – 700 с.
3. Техника высоких напряжений / под ред. М. В. Костенко. – М. : Высшая школа, 1973. – 528 с.
4. Базуткин В. В. Техника высоких напряжений / Базуткин В. В., Ларионов В. П., Пинталь Ю. С. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.
5. Техника высоких напряжений / под ред. Д. В. Разевига. – М.-Л. : Энергия, 1963. – 471 с.
6. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения / [М. Байер, В. Бек и др.] ; перевод с немецкого. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 555 с.
7. Техника высоких напряжений / под ред. Д. В. Разевига. – М.: Энергия, 1976. – 488 с.
8. В. Ф. Важов Техника высоких напряжений / В. Ф. Важов, В. А. Лавринович, С. А. Лопаткин – Томск, Изд-во ТПУ, 2006.– 119 с.

ЗМІСТ

Вступ	3
РОЗДІЛ I. РОЗРЯДИ В ГАЗАХ	4
1.1. Конфігурація електричних полів	4
1.2. Іонізаційні процеси в газі	6
1.3. Види іонізації	8
1.4. Лавина електронів	13
1.5. Умова самостійності розряду	15
1.6. Утворення стримера	16
1.7. Закон Пашена	17
1.8. Розряд у неоднорідних полях	20
1.9. Ефект полярності	21
1.10. Бар'єрний ефект	24
1.11. Вольт-секундна характеристика	26
1.12. Коронний розряд	30
1.13. Втрати енергії при коронуванні	33
1.14. Розряд у повітрі по поверхні ізоляторів	34
1.15. Пробій рідких діелектриків	40
1.16. Пробій твердої ізоляції	49
Контрольні запитання та завдання до I розділу	55
РОЗДІЛ II. ВИСОКОВОЛЬТНА ІЗОЛЯЦІЯ	57
2.1. Високовольтні ізолятори	62
2.2. Ізоляція високовольтних конденсаторів	63
2.3. Ізоляція трансформаторів	64
2.4. Ізоляція кабелів	65
2.5. Ізоляція електричних машин	65
2.6. Профілактика ізоляції	66
Контрольні запитання та завдання до II розділу	76
РОЗДІЛ III. ВИСОКОВОЛЬТНЕ ВИПРОБОВУВАЛЬНЕ ТА ВИМІРЮВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ	78
3.1. Установки для одержання високих змінних напруг	78
3.2. Установки для одержання високих постійних напруг	79
3.3. Імпульсні випробовувальні установки	83

3.4. Вимірювання високих напруг	85
Контрольні запитання та завдання до III розділу	90
РОЗДІЛ IV. ПЕРЕНАПРУГИ Й ЗАХИСТ ВІД НИХ	91
4.1. Класифікація перенапруг	91
4.2. Внутрішні перенапруги	92
4.3. Грозозахист повітряних ліній електропередач і підстанцій	93
4.4. Засоби захисту від перенапруг	99
4.5. Хвильові процеси у лініях	101
4.6. Хвильові процеси в обмотках трансформаторів	108
4.7. Перенапруги при вимкненні ненавантажених ЛЕП і батарей конденсаторів	118
Контрольні запитання та завдання до IV розділу	124
Список рекомендованої літератури	125

Навчальне видання
ТЕХНІКА ВИСОКИХ НАПРУГ
Навчальний посібник

Укладачі: **Майструк** Едуард Васильович
Козярський Дмитро Петрович

Відповідальний за випуск *Мар'янчук П.Д.*
Літературний редактор *Макарова О.П.*
Комп'ютерний набір і технічна редакція *Майструк Е.В.*

Підрисано до друку 24.04.2012. Формат 60x84/16.
Папір офсетний. Друк різнографічний. Умов. друк. арк. 7.
Обл.-вид. арк. 7,5. Зам. Н-252. Тираж 75.
Друкарня Чернівецького національного університету
58012, Чернівці, вул. Коцюбинського, 2.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №891 від 08.04.2002 р.