



**Міністерство освіти і науки України
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИ-**

**Факультет енергетики, робототехніки та
комп'ютерних технологій
Кафедра електропостачання та
енергетичного менеджменту**

С. А. Попадченко

ТЕХНІКА ВИСОКИХ НАПРУГ

Курс лекцій

**для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти
денної (заочної) форми навчання
за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»**

**Харків
2024**



Міністерство освіти і науки України
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет енергетики, робототехніки та
комп'ютерних технологій
Кафедра електропостачання та
енергетичного менеджменту

С. А. Попадченко

ТЕХНІКА ВИСОКИХ НАПРУГ

Курс лекцій

**для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти
денної (заочної) форми навчання
за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»**

Затверджено
рішенням Науково-методичної ради
факультету енергетики, робототехніки
та комп'ютерних технологій
Протокол № 7
від 26. 04. 2024 р.

**Харків
2024**

УДК 621.3.048.1

В 19

Схвалено
на засіданні кафедри електропостачання
та
енергетичного менеджменту
Протокол № 10 від 28. 03. 24 р.

Рецензенти:

Н. Г. Косуліна, доктор техн. наук, проф. кафедри електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та електротехніки ДБТУ;

Ю. М. Хондола, канд. техн. наук, зав. кафедри електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та електротехніки ДБТУ.

В-19 Техніка високих напруг: Курс лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної (заочної) форми навчання за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»/ С. А. Попадченко, О. А. Савченко / – Електрон. дані. – Х. : ДБТУ, 2024. – 92 с.

Курс лекцій з дисципліни «Техніка високих напруг» складений відповідно до програми навчальної дисципліни. У курсі лекцій висвітлені теоретичні аспекти електродинамічних процесів в газах, явища корони на проводах ЛЕП та заходи боротьби з нею, розглянуті апарати захисту від перенапруг та методи їх вибору. Викладено розрядні процеси в повітряних проміжках при грозових перенапругах, заходи і засоби захисту від всіх видів перенапруг.

Призначено для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної (заочної) форми навчання за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

УДК 621.3.048.1

Відповідальний за випуск: О. О. Мірошник, доктор технічних наук, професор

© Попадченко С. А.,
Савченко О. А., 2024
© ДБТУ, 2024

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ.....	5

Лекція № 1. Електричні розряди газів.....	7
Лекція № 2. Пробій конденсованих середовищ - рідких і твердих діелектриків.....	17
Лекція № 3. Використання напівпровідникових плівок. корона на проводах ПЛ.....	29
Лекція № 4. Основні види електричної ізоляції. Конфігурація електричних полів. Високовольтна ізоляція.....	39
Лекція № 5. Зовнішня ізоляція повітряних ліній і розподільних пристроїв.....	54
Лекція № 6. Високовольтне випробувальне обладнання та вимірювання.....	61
Лекція № 7. Перенапруги і захист від них.....	73

ВСТУП

Вітаємо вас, шановні слухачі курсу “Техніка високих напруг”.

Техніка високих напруг (ТВН) виникла у зв'язку з необхідністю електропередачі великих електричних потужностей на далекій відстані.

Підвищення рівня напруг вимагає вивчення фізичних явищ, механізмів впливу електромагнітних полів високої напруги на ізоляцію за умов експлуатації. Надзвичайно велике значення при цьому набувають питання створення та експлуатації комплексу обладнання, необхідного для генерування, передачі, перетворення та розподілу електричної енергії: генераторів, трансформаторів, повітряних та кабельних ліній, конденсаторів та ін. апаратів.

Висока напруга використовується в електрофізичних установках для розв'язання задач потужної імпульсної енергетики: прискорювачі пучків заряджених частинок, потужні лазери, установки керованого термоядерного синтезу. Застосовується в технологічних процесах, таких як електросепарація, електрофільтрація, електрофарбування, магнітоімпульсна обробка, електрогідравлічне штампування, плазмохімія, отримання озону.

Особлива роль належить такій швидко розвиваючій області нанотехнології як синтез наноструктурних матеріалів з новими властивостями. Синтез таких матеріалів проводиться у спеціальних установках при впливі концентрованих потоків енергії у вигляді потоків плазми і пучків заряджених частинок, основним вузлом яких є високовольтний імпульсний генератор.

Дисципліна ґрунтується на знаннях, отриманих у загальних дисциплінах теоретичні основи електротехніки, електричні машини та взаємопов'язана з іншими дисциплінами: електричні станції та підстанції, електроенергетичні системи та мережі, релейний захист та автоматизація електроенергетичних систем, електропостачання.

Набуті знання будуть безпосередньо використані студентами при вивченні наступних дисциплін, проходження виробничої практики, написання випускних кваліфікаційних робіт.

МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ

Мета вивчення дисципліни: полягає в формуванні у студентів знань про електрофізичні процеси в ізоляції електроустаткування, механізми розвитку грозових та внутрішніх перенапруг, координацію ізоляції та її проектування, методи випробувань та контроль стану ізоляції.

Ключові завдання:

Вивчення дисципліни «Техніка високої напруги» сприяє вирішенню наступних завдань професійної діяльності:

- освоєння студентами методів оцінки електричної міцності ізоляції;
- визначення надійності та розрахунок зони захисту блискавкозахисту;

- визначення рівня перенапруг у мережах високої та надвисокої напруги;
- вміння вибору захисних пристроїв від внутрішніх та зовнішніх перенапруг.
- формування загальнокультурних та професійних компетенцій у галузі інформаційних технологій.

В результаті освоєння дисципліни студент повинен:

Знати: вимоги Правил улаштування електроустановок стосовно вибору ізоляційних відстаней та пристроїв захисту від перенапруг, вимоги Керівного документа — Обсяг та норми випробувань електрообладнання

Вміти: вибирати ізоляційні відстані, оцінювати надійність блискавкозахисту відкритих розподільних пристроїв та повітряних ліній електропередачі, визначати необхідні параметри нелінійних обмежувачів перенапруг та вентильних розрядників;

Володіти: навичками вимірювання та аналізу діагностичних параметрів ізоляції високовольтного обладнання, вирішення завдань техніки високої напруги за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення.

ЛЕКЦІЯ № 1 - ЕЛЕКТРИЧНІ РОЗРЯДИ В ГАЗАХ.

- 1. Переваги та недоліки газової ізоляції**
- 2. Повітря та елегаз**
- 3. Види електричних розрядів в газах**

4. Вплив тиску на електричні розряди
5. Види іонізацій

6. Лавина електронів

7. Пробивна напруга

8. Стримерна теорія розряду
9. Дуговий розряд
10. Коронний розряд на проводах ЛЕП

ЛІТЕРАТУРА

1. Акімов О. І., Сушко Д. Л. Техніка високих напруг. Ізоляція та перенапруги в пристроях електропостачання і електричної тяги залізничного транспорту: Навч. посібник. – Харків: УкрДАЗТ, 2009. – 217 с.
2. Василюк С. В., Василюк К. С. Техніка високих напруг: навчальний посібник [Електронне видання]. – Рівне : НУВГП, 2018. – 187 с.
3. Красько, А.С. Техника высоких напряжений (изоляция и перенапряжения): курс лекций: в 2 ч. / А.С. Красько, Е.Г. Пономаренко. – Минск: БНТУ, 2011. – Ч. 1: Электрические разряды в газах. Внешняя изоляция воздушных линий и распределительных устройств. Внутренняя изоляция. – 119 с.

Гази, як ізолююче середовище, широко застосовуються на повітряних лініях, у розподільних пристроях (РП) та іншій електричній апаратурі. Як ізолюючі гази використовують повітря, елегаз (SF_6), азот, суміш елегазу з азотом та ін.

Повітря.

Переваги газової ізоляції – це відносно низька вартість, висока електрична міцність, властивість «самовідновлення», хороша теплопровідність.

Головним недоліком повітря є те, що під дією на нього корони утворюється озон і окис азоту, що у свою чергу призводить до старіння твердої ізоляції та корозії. В даний час для виготовлення газової ізоляції використовуються такі гази: елегаз, азот, суміш елегазу з азотом та деякі фторвуглеці. Багато з цих газів мають електричну міцність вищу, ніж у повітря.

Недоліком багатьох ізоляційних газів є токсичність, висока температура зрідження, здатність виділяти вуглець, який осідаючи на поверхні твердої ізоляції, збільшує її провідність.

Елегаз.

У нових високовольтних комутаційних апаратах елегаз застосовується як ізолююче і дугогасне середовище.

Комутаційна здатність та діелектричні властивості комутаційних апаратів залежать від щільності елегазу, яка постійно повинна контролюватися. Виток через ущільнення або корпус повинні автоматично визначатися приладами. Елегаз не токсичний, не схильний до забруднення або зволоження, не вогнебезпечний і не має озоноруйнівного ефекту. Однак він включений до списку парникових газів через широке використання в електроенергетиці.

Види електричних розрядів в газах

Розряди в газах можуть мати самостійний і несамостійний характер.

Якщо в газовому проміжку струм протікає лише під впливом зовнішнього іонізатора, такий розряд називається *несамостійним* (рис. 1.1, ділянка ОАВС). Якщо струм розряду залежить від параметрів ланцюга (опору та потужності джерела), то розряд називається *самостійним* (рис. 1.1, після точки С).

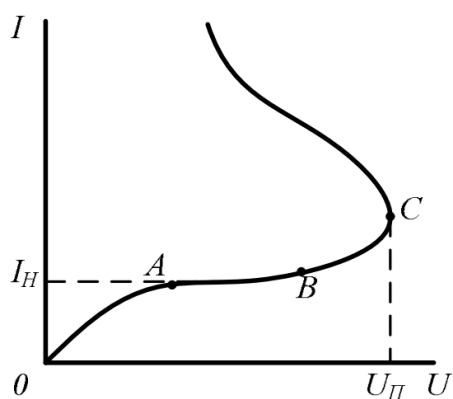


Рисунок 1.1 - Вольт-амперна характеристика газового розряда:

$U_{\text{п}}$ – напруга пробою; $I_{\text{н}}$ – струм насичення .

Для підтримання самостійного розряду не потрібно утворення заряджених частин за рахунок зовнішніх іонізаторів.

При малих тисках через невелику кількість молекул проміжок не може набути великої провідності. Тоді виникає тліючий розряд з густиною струму $j = 1-5 \text{ мА/см}^2$. Розряд охоплює всю область між електродами.

При атмосферному тиску (або вище) за малої потужності джерела або при короточасному прикладенні напруги виникає іскровий розряд (блискавка). При тривалій дії напруги іскровий розряд періодично повторюється до зняття напруги.

При великій потужності джерела живлення розряд може мати дуговий характер. У цьому випадку струм може досягати 102-103 А, а температура до 6000 °С.

У різко неоднорідному полі самостійний розряд має вигляд **корони** (світіння). При коронному розряді в проміжку між електродами не виникає наскрізного каналу високої провідності, але при подальшому збільшенні напруги може виникати іскровий або дуговий розряд.

Розряд у повітряному проміжку при тривалому впливі напруги

Необхідною умовою розвитку розряду газів є наявність вільних електронів. Вільні носії зарядів можуть виникати за рахунок зовнішніх впливів, і з допомогою емісії електронів із поверхні електродів. Вільні носії заряду, переважно електрони, під впливом електричного поля можуть набувати енергію, достатню для вибивання нових електронів під час зіткнення з молекулами чи атомами. Цей процес називається *ударною іонізацією*.

Процес іонізації газу при постійній напруженості електричного поля $E = \text{const}$ визначається енергією іонізації газу W_i та довжиною вільного пробігу електрона λ :

$$W_i = q \cdot E_i \cdot \lambda = q \cdot U_i, \quad (1.1)$$

де q - заряд електрона;

U_i – потенціал іонізації газу (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 - Потенціал іонізації газу.

газ	H ₂	N ₂	O ₂	SO ₂	Cl	N ₂ O
$U_i, \text{В}$	15,4	15,8	12,5	12,3	11,8	12,9

Якщо на довжині λ електрон набуває енергії та $W > W_i$, то має місце вибивання вільного електрона (вторинного електрона).

Вторинні електрони також можуть набувати енергію $W > W_i$ на довжині пробігу λ і породжувати при зіткненні нові вільні електрони. Таким чином, процес ударної іонізації може мати лавиноподібний характер.

Якщо $W < W_i$, виникає збуджений стан електрона атома. Цей стан не є стійким і через $\tau < 10^{-8}$ з збудженим електроном повертається на колишній енергетичний рівень.

При цьому має місце випромінювання кванта енергії. Якщо інший електрон повідомляє збудженому електрону енергію, необхідну іонізації, відбувається ступінчаста іонізація. Одночасно з іонізацією завжди йде рекомбінація, яка супроводжується виділенням енергії. Тож розряд супроводжується світінням. Довжина вільного пробігу λ залежить від тиску p , температури T

та ефективного перерізу σ_e носія заряду. Середнє значення λ можна визначити за таким виразом:

$$\lambda = \frac{k \cdot T}{p \cdot \sigma_e}, \quad (1.2)$$

де k - Постійна Больцмана.

Ефективний переріз σ_e визначається діаметром рухомих частинок (електронів або іонів) та діаметром молекул. Оскільки величина λ не є постійною, то в теорії газового розряду прийнято використовувати **коефіцієнт ударної іонізації** α , який є число іонізацій, здійснюваних електроном на одиничному шляху вздовж лінії поля:

$$\alpha = A \cdot p \cdot \exp\left(-\frac{B \cdot p}{E}\right), \quad (1.3)$$

де A і $B = \frac{AW_i}{q}$ – постійні коефіцієнти, що залежать від характеристик газу і його температури;

E – напруженість електричного поля між електродами.

Ефективним коефіцієнтом іонізації називається

$$\square \alpha_e = \alpha - \eta, \quad (1.4)$$

де $\square \eta$ – коефіцієнт прилипання, кількість актів захоплення електрона (рекомбінації) на 1 см шляху.

Лавина електронів

Потік електронів, що безперервно наростає, називається **лавиною електронів**.

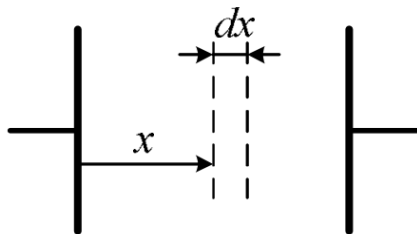


Рисунок 1.2. - Визначення числа електронів у лавині.

На ділянці dx (рис. 1.2) збільшення вільних електронів дорівнюватиме

$$dn = \alpha \cdot ndx, \square \quad (1.5)$$

де n - число вільних електронів, що утворилися на ділянці x , за наявності одного початкового вільного електрона.

В однорідному електричному полі ($E = const$) \square

$$\frac{dn}{n} = \alpha \cdot ndx; \quad \int \frac{dn}{n} = \ln n; .$$

$$n = e^{\alpha \cdot x} . \quad (1.6)$$

Для виникнення самостійного розряду (лавини електронів) необхідно, щоб у результаті початкової лавини, що розвинулася, виник хоча б один вторинний вільний електрон, здатний викликати нову лавину. У цьому випадку умова розвитку розряду у загальному вигляді:

$$\gamma_i \cdot \exp\left(\int_0^L \alpha \cdot dx\right) > 1, \quad (1.7)$$

де γ_i – коефіцієнт вторинної іонізації, який є числом вторинних електронів, віднесене до одного акту іонізації в лавині;

L – відстань між електродами.

Для однорідного поля

$$\alpha \cdot L = \ln\left(\frac{1}{\gamma_i}\right) > 1 = K. \quad (1.8)$$

Для повітря при атмосферному і вищому тиску умовою виникнення самостійного розряду буде $\alpha \cdot L = 20$, при знижених тисках - $\alpha \cdot L = 4$.

Пробивна напруга

Якщо дотримується умова самостійного розряду $\alpha \cdot L = K$, то кількість електронних лавин зростає. При цьому наступна лавина розвивається ще до того, як позитивні іони попередньої лавини встигають досягти катода. У такому випадку лавини поширюються по всьому проміжку L і газ у проміжку приходить в стан плазми. Настає іскровий або дуговий розряд.

Значення пробивної напруги U_{np} можна отримати з умови самостійності розряду (1.8), підставивши α (1.3) і прийнявши, що напруженість в момент пробую дорівнює $E_{np} = U_{np}/L$:

$$\alpha \cdot L = A \cdot L \cdot p \cdot \exp\left(-\frac{BpL}{U_{np}}\right). \quad (1.9)$$

Тоді із (1.9) під час запису $\alpha \cdot L = K$

$$U_{np} = \frac{B \cdot p \cdot L}{\ln \frac{A \cdot p \cdot L}{K}}. \quad (1.10)$$

Вираз (1.10) є математичним виразом експериментального закону Пашена, з якого випливає, що пробивні напруги в однорідному полі при $T = \text{const}$ є функцією добутку тиску p і відстані між електродами L :

$$\square U_{np} = f(p \cdot L). \quad (1.11)$$

Для практичних розрахунків пробивної напруги можна використовувати більш простий вираз:

$$U_{np} = a \cdot \delta \cdot L + b \cdot \sqrt{\delta \cdot L}, \quad (1.12)$$

де a, b – постійні, що залежать від роду газу (для повітря $a = 5,24$ кВ/см і $b = 4,6$ (кВ/см)^{1/2});

δ – відносна густина повітря:

$$\delta = \frac{p \cdot T_0}{p_0 \cdot T}, \quad (1.13)$$

де T_0 і p_0 відповідають нормальним атмосферним умовам

($p_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па або 760 мм рт. ст. і $T_0 = 20$ °С).

При $L = 1$ см і нормальним умовам $E_{пр} = 30,0$ кВ/см. При збільшенні $L > 1$ см $E_{пр} = 5,24$ кВ/см. При $L \gg 1$ м $E_{пр} = 1,5-2,5$ кВ/см.

Стримерна теорія розряду.

На довгих проміжках пробивна напруга значно нижче значень, набутих розрахунковим шляхом виходячи з теорії ударної іонізації. Дослідження розрядів у довгих проміжках призвели до появи стримерної теорії розряду.

Сутність цієї теорії полягає в тому, що після утворення початкової лавини 1 (рис. 1.3) з відривом x_k від катода щільність електронів на чолі лавини різко зростає, отже зростає і напруженість електричного поля на чолі лавини.

Таке явище має місце при $\alpha \cdot x_k \geq 20$. Завдяки цьому на деякій відстані x від голови первісної лавини можливе виникнення вільних електронів за рахунок фотонної іонізації. Фотоелектрони, що знаходяться у сильному електричному полі ($E_{зовн} + E_{внутр}$), набувають енергію, достатню для утворення нової лавини 2, яка переміщається до анода.

Таким чином, об'ємний заряд першої лавини виявляється «перенесеним» на відстань x . Область між цими лавинами заповнюється плазмою, що призводить до перерозподілу напруги на проміжку L та збільшення напруженості поля на окремих ділянках.

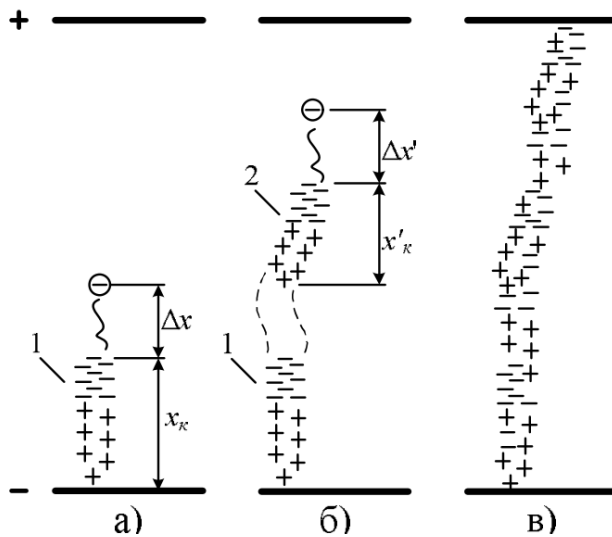


Рисунок 1.4. - Розвиток катодного стримеру.

Після досягнення стример аноду між електродами утворюється область високої провідності і виникає розряд. На стадії розвитку, коли стример замикається через ємність, амплітуда струму досягає 10 А. Коли стример досягає електродів, настає головний розряд і струм різко зростає. Розглянута схема розвитку називається катодним стримером і характерна для однорідного поля при $U > U_{np}$, а $x_k \ll L$. При напругах, близьких до пробивного ($U \approx U_{np}$), стример утворюється після пробігу початковою лавиною відстані від катода до анода. Такий стример називається анодним.

Дуговий розряд

Дуговий розряд - це самостійний розряд у газі, що характеризується високою температурою (6000-12 000 ° С) і великою густиною струму. Дуговий розряд виникає між контактами комутаційної апаратури, у розрядниках, між проводами ЛЕП.

Канал дуги поділяють три ділянки (рис. 1.5): 1 – катодний; 2 – стовп дуги; 3 – анодний. Довжина катодної ділянки близько 10^{-4} см, катодне падіння напруги U_k становить 10-20 В, напруженість поля $10^2 - 10^3$ кВ/см. Усе це зумовлює потужну емісію електронів із поверхні катода. Довжина анодної ділянки 3 трохи вище 10^{-4} см, анодне падіння напруги $U_a = 2-6$ В. Падіння напруги в стовпі дуги 2 рівномірне, напруженість поля $E_c = 15-30$ В/см. Така напруженість надає електронам прискорення, і у каналі створюється висока температура, що призводить до інтенсивної термічної іонізації. Довжина стовпа може сягати десятка метрів. Він є плазмою з високою електропровідністю.

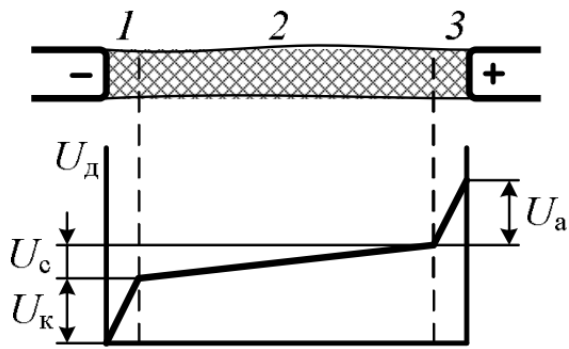


Рисунок 1.5 - Розподіл напруги у каналі.

Для прискорення гасіння дуги застосовують:

- 1) інтенсивне охолодження (дуття);
- 2) розбиття дуги на низку коротких дуг;
- 3) зменшення струму дуги до критичного значення.

Критична довжина дуги в мережах, наприклад 35 кВ, досягає 7–20 м, а в мережах 110 кВ – 20–60 м.

Коронний розряд на проводах ЛЕП

Короною називається лавинно-стрімерна стадія розряду в різко неоднорідному полі. У таких полях іонізаційні процеси починаються поблизу електрода з малим радіусом при напругах, менших за напругу перекриття проміжку. Коронний розряд супроводжується світінням, втратою енергії, електромагнітним випромінюванням і може спричинити виникнення хімічної реакції.

Корона на проводах ЛЕП змінного струму

При змінній напрузі об'ємний заряд виникає в один із напівперіодів, коли $U \geq U_H (E \geq E_H)$.

У перший напівперіод корона виникає, коли $U \geq U_H$.

При збільшенні напруги в інтервалі від U_H до U_m збільшується струм корони та об'ємний заряд, але напруженість поля залишається постійною E_H .

При досягненні $U = U_m$ коронування припиняється.

Якщо вважати, що заряд нерухомий, то напруженість поля у проводу знижуватиметься за синусоїдальним законом зі зсувом на ΔU щодо напруги.

Коли в негативний напівперіод напруженість поля досягне значення E_H , виникає коронний розряд, але при меншому значенні напруги запалювання $U_3 < U_H$.

У другій і наступний напівперіоди коронування буде тривалішим, ніж у перший. Це пояснюється впливом об'ємного заряду. У наступний напівперіод

спочатку нейтралізується об'ємний заряд, що утворився в попередній напівперіод, а потім утворюється заряд протилежного знаку.

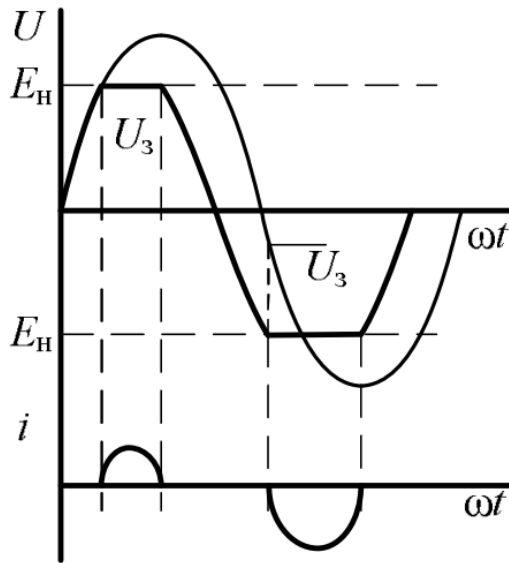


Рисунок 1.6 - Корона на проводі при змінному струмі.

При збільшенні U_m корона виникатиме за менших значень $U_3 < U_H$, а за більших значень U_m – навіть за $U=0$.

Оскільки $U_3 = U_H - \Delta U$, а $\Delta U = U_m - U_H$, то $U_3 = 2U_H - U_m$ – характеристика запалювання (рис. 1.7).

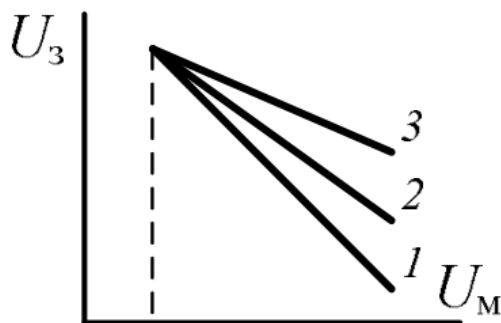


Рисунок 1.7 - Характеристика запалювання:

1 – за рівнянням; 2 – негативний напівперіод; 3 – позитивний

При зміні полярності кожен із напівперіодів об'ємний заряд відштовхується чи притягується до дроту.

При цьому лише незначна частина заряду досягає сусідніх фаз.

Тому вплив сусідніх фаз на процес коронування можна знехтувати, тобто корона на проводах ПЛ змінного струму є уніполярною.

Щоб унеможливити явище корони необхідно вибрати відповідний діаметр проводу:

$$U_H = E_H \cdot r \cdot \ln \frac{S}{r}; \quad E_H = 30,3 \cdot m \cdot \delta \quad (1.14)$$

$$U_H = 30,3 \cdot m \cdot \delta \cdot r \cdot \ln \frac{S}{r}, \quad (1.15)$$

де S - середньгеометрична відстань між проводами.

При $\delta = 1$ $\ln S/r = 6,2..$

Для ЛЕП 110-220 кВ мінімальне значення діаметра проводу має бути d_{min} 2,1 і 2,4 см.

Для напруги більше 220 кВ доцільно застосовувати розщеплення фази.

Виключити повністю явище коронування на проводах ЛЕП неможливо, тому що за різних погодних умов корона може виникати в місцях з неоднорідним полем.

Втрати енергії на корону можуть становити до 40% енергії втрат на нагрів.

Сумарні втрати на корону визначаються на основі експериментальних даних для різних погодних умов:

$$A = P_x t_x + P_\delta t_\delta + P_i t_i + P_c t_c, \quad \square \quad \square, \quad (1.16)$$

де P і t – відповідно питомі втрати та тривалість для гарної погоди, дощу, поморозі та снігу. \square

$$\sum t = 8760 \text{ год.}$$

Запитання для самоконтролю

1. Переваги та недоліки газової ізоляції
2. Для чого застосовується елегаз та від чого залежать діелектричні властивості комутаційних апаратів?
3. Як впливає тиск на розряд в повітрі?
4. В якому полі самостійний розряд має вигляд корони?
5. За яких умов процес ударної іонізації може мати лавиноподібний характер?
6. Від чого залежить довжина вільного пробігу електронів?

ЛЕКЦІЯ № 2 - ПРОБІЙ КОНДЕНСОВАНИХ СЕРЕДОВИЩ

1. Пробій рідких діелектриків

1.1. Вплив умов експлуатації на електричну міцність рідин

1.2. Механізм пробою рідких діелектриків

2. Пробій твердих діелектриків

2.1. Вплив умов експлуатації на електричну міцність твердих діелектриків

2.2. Механізм електричного пробою твердих діелектриків

2.3. Тепловий пробою твердих діелектриків

2.4. Тривала електрична міцність твердих діелектриків

ЛІТЕРАТУРА

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

5. Василюк С. В., Василюк К. С. Техніка високих напруг: навчальний посібник [Електронне видання]. – Рівне : НУВГП, 2018. – 187 с.

6. Красько, А.С. Техніка високих напруг (ізоляція і перенапруги): курс лекцій: в 2 ч. / А.С. Красько, Е.Г. Пономаренко. – Минск: БНТУ, 2011. – Ч. 1: Электрические разряды в газах. Внешняя изоляция воздушных линий и распределительных устройств. Внутренняя изоляция. – 119 с.

Пробій рідких діелектриків

Рідкі діелектрики, володіючи значно вищою електричною міцністю порівняно з газами, знайшли дуже широке застосування високовольтної ізоляції електротехнічного обладнання: трансформаторів, кабелів, конденсаторів, вимикачів, розрядників та ін.

Рідкі діелектрики можна класифікувати на такі групи:

- 1) вуглеводні мінеральні – продукти перегонки нафти та кам'яного вугілля: трансформаторне, конденсаторне та інші масла;
- 2) вуглеводні рослинні - рицинова, лляна та інші масла;
- 3) хлоровані вуглеводні ароматичного ряду - хлордифеніл, совол;
- 4) кремнійорганічні сполуки.

Крім цього, рідкі діелектрики можуть бути полярними та неполярними:

Неполярні	$\rho \leq 10^{18}$ Ом·см	$\varepsilon = 1,8 \dots 2,5$	$\operatorname{tg} \delta \approx 0,001$
Слабополярні	$\rho \approx 10^{11} \dots 10^{12}$ Ом·см	$\varepsilon > 2,5$	$\operatorname{tg} \delta \approx 0,01$

Сильнополярні $\rho \approx 10^7 \dots 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ $\varepsilon > 5$ $\text{tg } \delta > 0,1$

У промисловості мають справу з технічно чистими рідинами, що містять домішки води, газів, волокна целюлози, вуглецю, продуктів розкладання щонайменше $10^{-2} \div 10^{-3}$ масових відсотків. Порівняно газами пробивні напруги рідин мають дуже великий розкид. Відхилення від середнього становить до $50 \div 70 \%$, а середнє квадратичне відхилення $10 \dots 15 \%$.

Визначення електричної міцності масла $U_{пр}$ за ГОСТ 6581-75 здійснюється у стандартному пробійнику на змінній напрузі.

На пробій рідких діелектриків істотно впливає безліч факторів, які можуть як знижувати пробивну напругу (забруднення, зволоження та ін), так і збільшувати його (очищення, тиск, бар'єри і т.д.). Для добре очищених знегажених рідин величина електричної міцності досягає 1000 кВ/см .

Вплив умов експлуатації на електричну міцність рідин

Вплив вологи та мікродомішок

Волога в рідкому діелектрику може бути в трьох станах: молекулярно-розчиненому вигляді, у вигляді емульсії (дрібні кульки води розміром 210 мкм) і у вигляді водяного відстою на дні бака.

Розчинність води у рідких діелектриках залежить від температури.

Наприклад, у мінеральній олії при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ може розчинитися $\sim 40 \cdot 10^{-6}$ води за обсягом, а при $80 \text{ }^\circ\text{C}$ – $400 \cdot 10^{-6}$.

Наявність вологи в обох станах позначається на електричній міцності олії, особливо у присутності волокон. Внаслідок великої діелектричної проникності (для води $\varepsilon = 80$, для волокон целюлози $\varepsilon = 6,4$) частинки вологи та волокна втягуються в область найбільшої напруженості електричного поля, поляризуються та витягуються вздовж силових ліній поля. Це призводить до утворення «містків», які збільшують локальну густину струму, нагрівання, сильному збільшенню локальної напруженості поля у місцях розривів містків, іонізації та пробією всього міжелектродного проміжку.

Залежність пробивної напруженості трансформаторної олії від вмісту вологи (рис. 2.1) показують, що наявність $0,01\%$ вологи зменшує електричну міцність олії у кілька разів.

Зниження електричної міцності в області малих концентрацій викликано впливом розчиненої вологи, а в області великих концентрацій – емульгованої вологи. На рис. 2. 1. показані зони розчинності вологи для олій із різною в'язкістю. Наявність вологи та волокон слабо позначається на міцності рідких діелектриків при коротких імпульсах напруги (одиниці-десятки

мікросекунд), оскільки частки домішок не встигають переміститися на значну відстань та вплинути на розвиток розряду рідини.

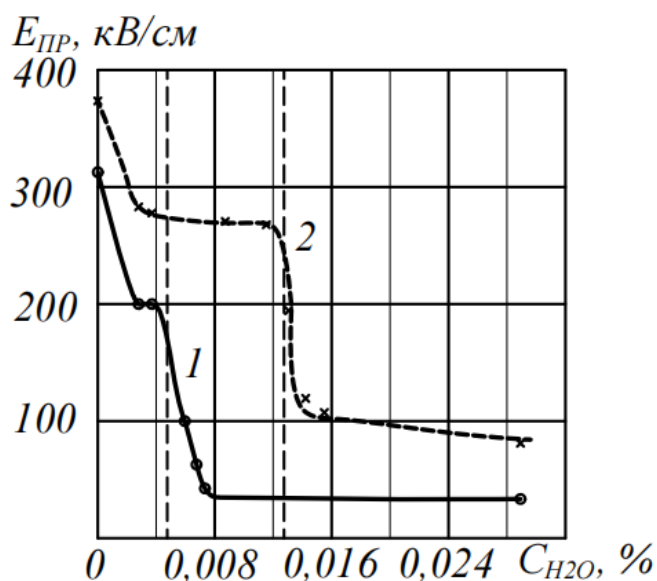


Рисунок 2.1 - Залежність електричної міцності олії від вмісту води: 1 – трансформаторна олія; 2 – в'язка кабельна олія.

Загальна кількість води, яка може бути в маслі в молекулярно-розчиненому та емульгованому вигляді, обмежена. При вмісті води понад 0,02% вона коагулюється і випаде у вигляді відстою на дно. Хоча сам відстій і не впливає на електричну міцність, його поява свідчить про суттєве погіршення ізоляційних властивостей масла. Особливо різке зменшення розрядної напруги відбувається за наявності в маслі гігроскопічних забруднень у вигляді волокон паперу, кар-тону, пряжі, що значно полегшують утворення провідних містків. Ці забруднення з'являються в маслі при його фільтрації в процесі експлуатації елементів твердої ізоляції, що знаходяться в маслі.

Вплив тиску

Пробивна напруга як технічних, так і рідких очищених діелектриків при промисловій частоті 50 Гц залежить від тиску. Це пов'язано з наявністю та утворенням у рідині при високій напрузі бульбашок газу, що є осередками розвитку пробою, а електрична міцність газу збільшується зі зростанням тиску відповідно до закону Пашена.

Закон Пашена:

Якщо в однорідному полі добуток довжини розрядного проміжку та тиску газу лишається незмінним, то величина пробивної напруги також є незмінною. Закон Пашена стверджує, що при незмінній температурі розрядна напруга газового проміжку з однорідним полем є функцією добутку тиску p на відстань L між електродами. Якщо знизити тиск газу (при $L = const$), відповідно збільшується розрядна напруга, що обумовлено скороченням числа зіткнень електронів з атомами (ліва «гілка» закону Пашена). При збільшенні тиску (права «гілка» закону Пашена) розрядна напруга зростає за

рахунок зменшення імовірності іонізацій атомів газу завдяки зменшенню кінетичної енергії електронів $W_e = e \cdot E \cdot x$ (зменшується довжина вільного пробігу x).

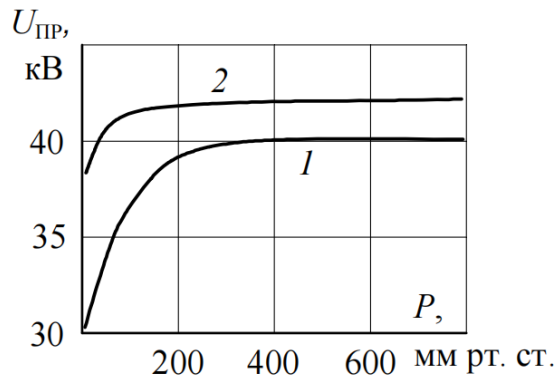


Рисунок 2.2 - Залежність пробивної напруги трансформаторної олії від тиску: 1 – недегазована олія; 2 – дегазована олія.

На рис. 2.2 представлені залежності пробивної напруги трансформаторної олії від тиску нижче атмосферного.

При знижених тисках з олії починають виділятися розчинені у ньому газу, та її міцність різко падає (рис. 2.2, крива 1). Видно, що пробивна напруга помітно збільшується з підвищенням ступеня очищення олії, що свідчить про великий вплив газоподібних домішок.

При тиску вище атмосферного (рис. 2.3) електрична міцність олії збільшується, що також свідчить про наявність газу в олії та її вплив на електричну міцність олії.

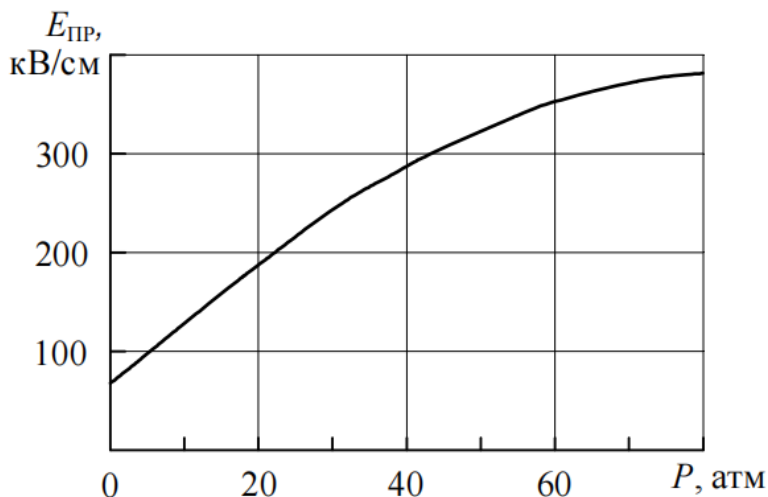


Рисунок 2.3 - Залежність пробивної напруженості недегазованої парафінової олії від тиску

При імпульсних впливах тиск практично не позначається на електричній міцності рідких діелектриків. Для розрахунку величини розрядної напруги

повітряного проміжку (кВ) з однорідним полем використовують зручну формулу:

$$U_p = 24,5 \cdot \delta \cdot L + 6,4\sqrt{\delta \cdot L}, \quad (5)$$

де відносна густина повітря $\delta = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T}$, L в (см), U_p в (кВ).

Величина розрядної напруги в повітряному проміжку $L=1$ см при нормальних атмосферних умовах ($T=293$ К, $p=760$ мм.рт.ст.) складає за (5) 30,9 кВ, а при збільшенні довжини L проміжку $E_p = U_p / L_3$

зменшується і наближається до 24, 5кВ/см.

Вплив температури

Для сухих чистих рідин значний вплив температури спостерігається в області інтенсивного випаровування і кипіння (рис. 2.4).

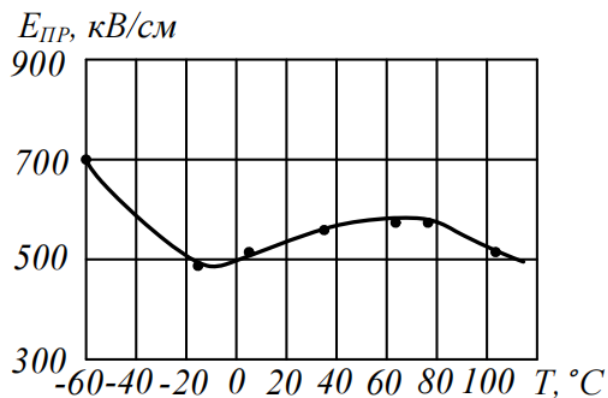


Рисунок 2. 4 - Залежність електричної міцності вологої трансформаторної олії від температури на змінній напрузі 50 Гц

Для технічно чистих рідин із домішкою вологи залежність електричної міцності від температури є досить складною. З рис. 2. 4 видно, що має місце мінімум і максимум електричної міцності. Зниження температури від точки максимуму призводить до зменшення E_{np} до мінімуму, що пов'язано з переходом розчиненої вологи в емульгований стан.

Подальше зниження температури ($< 0^0$ С) викликає замерзання крапельок води і, як наслідок, підвищення E_{np} . У льоду діелектрична постійна $\epsilon_{л}$ близька до діелектричної постійної масла $\epsilon_{м}$, що зменшує вплив вологи на електричну міцність масла. Зменшення електричної міцності для сухих і технічних масел при температурі вище $+80^0$ з обумовлено інтенсивним випаром і кипінням рідини.

Вплив часу дії напруги

Електрична міцність рідких діелектриків істотно залежить від тривалості застосування напруги τ і тим більше, чим більше домішок у рідині (особливо вологи та волокон) (рис. 2.5).

Залежність $U_{пр} = f(\tau)$ для технічного трансформаторного масла можна розбити на 2 області.

Перша область I: волога та волокна не встигають пере-міститися і не впливають на електричну міцність. Різке збільшення електричної міцності при $\tau < 10^{-5}$ с пов'язане із запізненням розвитку розряду, коли час дії напруги стає порівнянно з часом формування розряду.

Друга область II: збільшення часу впливу напруги $\tau > 10^{-3}$ с призводить до зниження $U_{пр}$ внаслідок впливу вологи і волокон, а також утворення газових бульбашок під дією нагрівання струмами провідності.

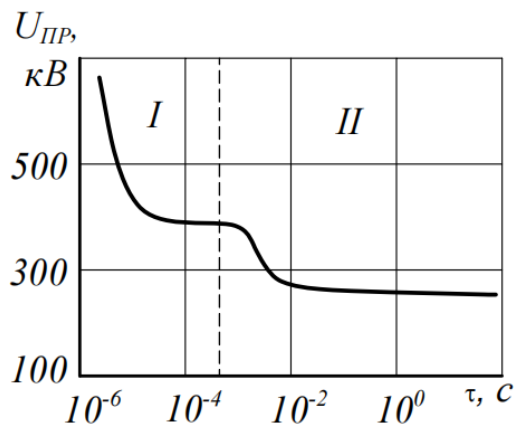


Рисунок 2. 5 - Залежність пробивної напруги трансформаторного масла від часу: повна вольт-секундна характеристика.

Вплив матеріалу, геометрії електродів, відстані між ними та полярності напруги

Збільшення коефіцієнта неоднорідності поля так само, як і в газах, знижує пробивну напругу. Навіть незначне збільшення радіусу кривизни електродів у різко неоднорідних полях дає більш істотне збільшення $U_{пр}$ у порівнянні з повітрям.

Збільшення відстані між електродами S призводить до збільшення пробивної напруги (рис. 2.6), в узагальненому вигляді залежність пробивної напруги від відстані між електродами можна представити як

$$U_{пр} = A \cdot S^n, \quad (2.1)$$

де S - відстань між електродами;

A і n - постійні, що залежать від властивостей діелектрика та умов пробою.

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

У міру збільшення відстані між електродами вплив матеріалу електродів зменшується і при відстані кілька міліметрів припиняється. Електрична міцність у малих проміжках залежить від висоти потенційного бар'єру для носіїв заряду на межі метал-діелектрик (роботи виходу електронів).

Як впливає з рис. 2.6 пробивна напруга залежить від полярності електроду - вістря при несиметричній системі електродів.

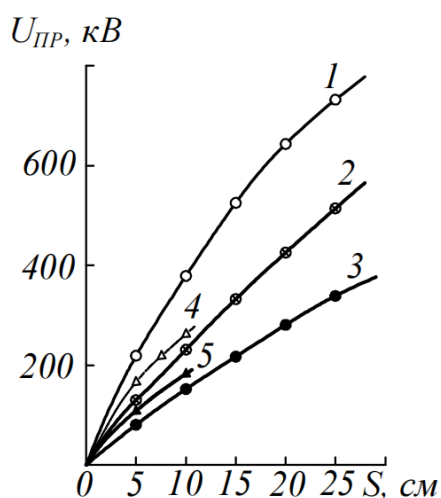


Рисунок 2.6 - Залежність пробивної напруги від відстані для трансформаторного масла, електроди вістря-площина:

1 – стандартний імпульс негативної полярності; 2 – стандартний імпульс позитивної полярності; 3 – змінна напруга 50 Гц; 4 – постійна напруга негативної полярності; 5 – постійна напруга позитивної полярності

Бар'єрний ефект

Бар'єри з твердого ізоляційного матеріалу, що встановлюються в маслі між електродами, широко застосовуються для підвищення міцності електричної масляної ізоляції. Збільшення $E_{ДПР}$ зумовлено двома чинниками.

Бар'єр непроникний для іонів рідини. Тому іони, рухаючись від одного електрода до іншого, осідають на бар'єрі, розтікаються по його поверхні і заряджають її. Завдяки цьому електричне поле в проміжку вирівнюється, що призводить до збільшення пробивної напруги. Крім цього, бар'єр ускладнює утворення суцільних містків, що проводять, з волокнистих речовин, що знаходяться в маслі. Дія бар'єрів ефективніше в неоднорідних полях і за трива-

лого впливу напруги. При короткочасних імпульсних впливах напруги бар'єри менш ефективні, ніж на постійній і змінній напругі.

На рис. 2.7 представлено відносну зміну пробивної напруги U_{δ}/U_{np} (U_{np} – пробивна напруга чисто масляного проміжку, а U_{δ} – пробивна напруга того ж проміжку з бар'єром) залежно від відстані до бар'єру S_{δ}/S ($S = 75$ мм – відстань між електродами, а S_{δ} – відстань від вістря до бар'єру) у масляному проміжку, утвореному електродами вістря – площина при дії змінної напруги з частотою 50 Гц.

Бар'єр – плоский електрокартон завтовшки 5 мм. Пробивна напруга масляного проміжку без бар'єру дорівнює 1 (умовних одиниць). Наявність бар'єру призводить до збільшення пробивної напруги. Максимальний ефект відповідає відстані до бар'єру $S_{\delta} \approx 0,25 S$, що добре корелює з аналогічним ефектом для газу та твердих діелектриків.

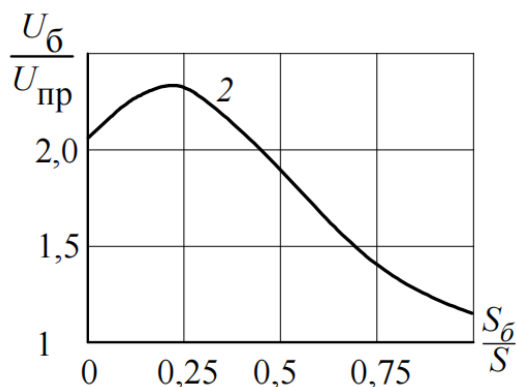


Рисунок 2.7 - Вплив бар'єру на пробивну напругу масляного проміжку типу вістря-площина.

Пробій твердих діелектриків

Залежно від електрофізичних характеристик твердого діелектрика, виду напруги та умов роботи можна встановити три основні види пробою.

1. Електричний пробій, що виникає в результаті розвитку іонізації (без хімічних перетворень і перегріву), що практично не залежить від температури.

2. Тепловий пробій, пов'язаний з розігрівом діелектрика внаслідок енергії, що виділяється в ньому, при протіканні струму провідності та діелектричних втрат. При цьому тепловиділення у твердому діелектрику має перевищувати тепловіддачу в довкілля, що обумовлює зростання температури в часі, деградацію діелектрика та формування провідного каналу.

3. Пробій при тривалому прикладенні напруги, пов'язаний з розвитком незворотних процесів: хімічних перетворень, утворенням субмікро- та мікротріщин, розвитком часткових розрядів.

Пробивна напруженість більшості твердих діелектриків при електричному пробої в однорідному полі становить $10^2 \dots 10^3$ кВ/см, при тепловому – $10 \dots 10^2$ кВ/см. Найбільший вплив на електричну міцність твердих діелектриків надає час прикладення напруги, температура, товщина діелектрика, ефект полярності.

Вплив умов експлуатації на електричну міцність твердих діелектриків

Вплив часу застосування напруги

Узагальнена вольт-секундна характеристика пробою твердих діелектриків наведена на рис. 2.8.

Якщо час прикладання напруги не перевищує частки секунди, області I і II, то пробій має суто електричний характер.

Теплові процеси через свою інерцію не встигають розвинутися настільки суттєво, щоб вплинути на $U_{пр}$.

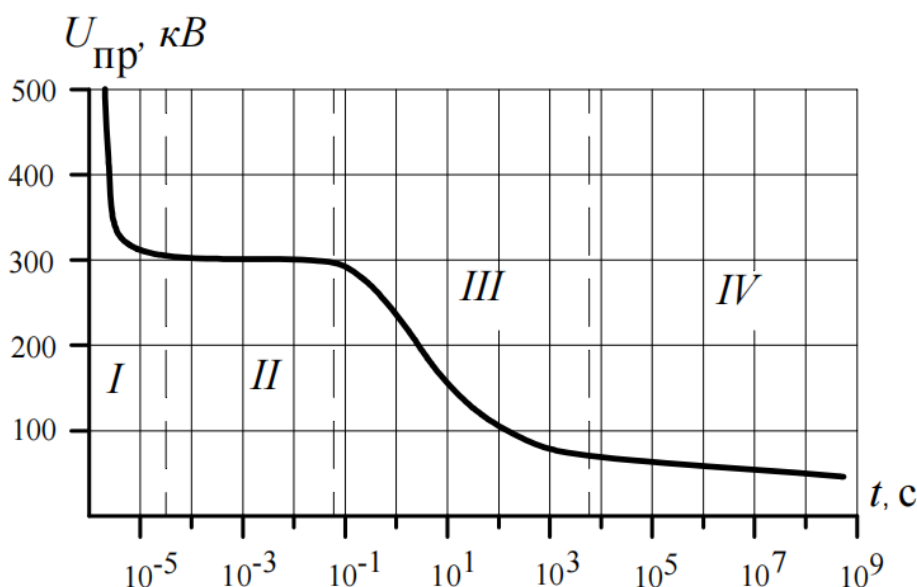


Рисунок 2. 8 - Залежність пробивної напруги електрокартону від часу дії напруги: поле – однорідне; середовище – трансформаторне масло; товщина – $2 \dots 2,5$ мм

Область III характеризується різким спадом пробивної напруги, що, безперечно, говорить про переважну роль теплових процесів при пробої.

Область IV – найнижча, квазіусталена (дуже повільно спадаюча в часі) пробивна напруга, обумовлена повільними процесами деградації (старіння) твердого діелектрика.

Різке зростання пробивної напруги в області I пов'язане із запізненням розвитку каналу пробою. Швидкість розвитку розрядних каналів у твердому

діелектрику залежить від коефіцієнта перенапруги і становить $(0,1 \dots 1,0) \cdot 10^6$ см/с.

Отже, час виникнення різкого зростання пробивної напруги залежатиме від товщини твердого діелектрика.

Залежність пробивної напруги від часу застосування напруги, що відповідає електричній формі пробою, називається вольт-секундною характеристикою (ВСХ) (на рис. 2. 8 це тимчасовий інтервал $t < 10^{-1}$ с), а при t більше 10^{-1} с - вольт-тимчасова.

Вплив товщини діелектрика та полярності електродів

Електрична міцність діелектрика при постійних геометричних параметрах електродів збільшується із зменшенням товщини діелектрика.

На рис. 2. 9 наведено залежність електричної міцності E_{np} непросоченого конденсаторного паперу від товщини на змінній напрузі 50 Гц.

На рис. 2.10 показано залежність U_{np} від товщини діелектрика на імпульсній напрузі для різних полярностей електродів.

Спостерігається різке зростання E_{np} при товщині 20 мкм (мікромметр дорівнює 10^{-3} міліметра) і менше. Тонкі шари діелектрика використовується в ізоляції конденсаторів, міжвиткової та міжшарової ізоляції трансформаторів, паперово-масляної та плівково-масляної ізоляції кабелів, вводів.

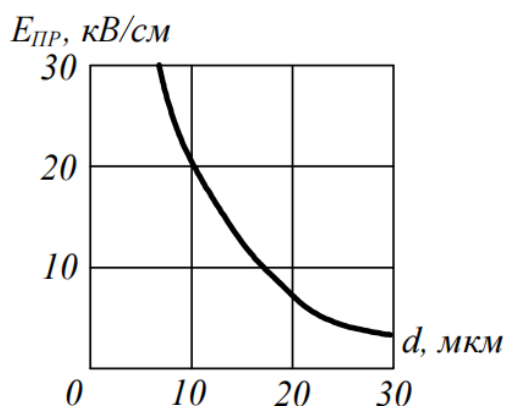


Рисунок 2. 9 - Залежність електричної міцності непросоченого конденсаторного паперу від товщини на змінній напрузі U_{\sim}

Збільшення пробивної напруги із зростанням товщини ізоляції відбувається з насиченням як для органічної, так і неорганічної ізоляції (рис. 2.10). Характер цих залежностей аналогічний E_{np} газів та рідин: зниження електричної міцності E_{np} діелектриків зі збільшенням товщини у широкому діапазоні зміни товщин.

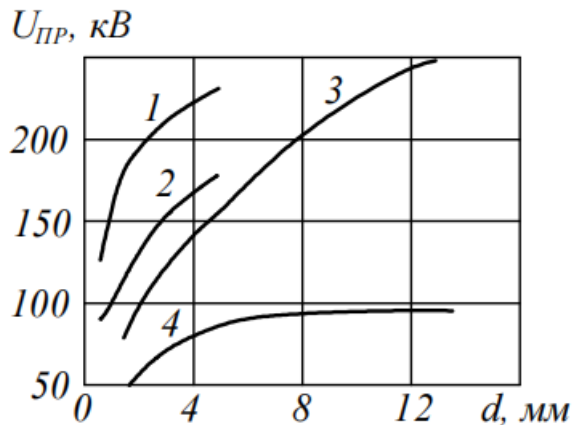


Рисунок 2.10 - Залежність U_{PP} від товщини діелектрика на імпульсній напрузі: поле вістря-площина. 1,2 – оргскло; 3,4 - NaCl; 1,3-негативна, 2,4-позитивна полярність вістря.

Ефект полярності також притаманний твердим діелектрикам. Як видно із рис. 2. 10, зміна полярності електрода-вістря призводить до зміни електричної міцності діелектрика при одній і тій же його товщині. Пробивна напруга при негативній полярності електрода-вістря вище, ніж при позитивній. Ця різниця зростає із збільшенням діелектричної проникності ϵ (на рис. 2.10 для оргскла $\epsilon = 3,5$; для кам'яної солі $\epsilon = 5,6$). У полярних діелектриках так само, як і в рідинах, цей ефект більший, ніж у неполярних.

Вплив температури

Пробій твердих діелектриків залежно від температури всередині діелектрика має досить складний характер і може бути поділений на дві області відносно деякої критичної температури $T_{кр}$.

Наявність двох областей характерна як для органічних, так і для неорганічних діелектриків. На рис. 2.11 наведено подібні залежності для поліетилену (крива 1) та порцеляни (крива 2).

В області низьких температур пробивна напруга практично не залежить від температури.

Починаючи з критичної температури (для поліетилену $T_{кр} \approx +300$ С, для порцеляни $T_{кр} \approx +900$ С), відбувається різке та значне зниження електричної міцності. Залежності на рис. 2. 11 характерні для багатьох діелектриків.

Отже, для того самого діелектрика спостерігається дві температурні області: область теплового пробою - високі температури і область електричного пробою - низькі температури.

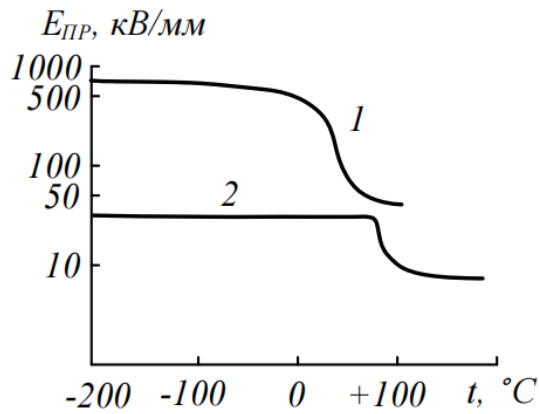


Рисунок 2.11 - Залежність електричної міцності від температури t :
1 - поліетилен; 2 - порцеляна.

Межа цих областей навіть для того самого матеріалу досить умовна, оскільки вона залежить від умов роботи (охолодження, вид напруги, форма імпульсу, частота).

При поганому охолодженні ізоляції або за високої температури навколишнього середовища ця межа зміщується у бік низьких температур.

Запитання для самоконтролю

1. Класифікація групи рідких діелектриків
2. В чому полягає закон Пашена?
3. Основні види пробою твердих діелектриків.
4. Для чого застосовується бар'єрний ефект?
5. Як змінюється пробій твердих діелектриків в залежності від температури?
6. Що впливає на величину пробивної напруги при незмінній S ?
7. Як впливає товщина діелектрика на пробій?

ЛЕКЦІЯ № 3 - ВИКОРИСТАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЛІВОК. КОРОНА НА ПРОВОДАХ ПЛ.

- 1. Використання напівпровідникових плівок**
- 2. Напруженість при застосуванні напівпровідникового покриття**
- 3. Напруженість за якої з'являється корона**
- 4. Формула Піка**
- 5. Основні способи зменшення втрат на корону**
- 6. Характер корони при малих діаметрах проводу**
- 7. Розширені та розщеплені проводи**
- 8. Причини негативних явищ при наявності корони**
- 9. Питомі втрати на корону за формулою Левітова**

ЛІТЕРАТУРА

1. Правила улаштування електроустановок. - Видання офіційне. Міненерговугілля України. - Х. : Видавництво «Форт», 2017. - 760 с. 6.

2. Абрамов В. Б. Техніка високих напруг: Курс лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В. Б. Абрамов, В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, О. Р. Проценко – Електронні текстові дані (1 файл: 8,95 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. –345с.

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

4. Василець С. В., Василець К. С. Техніка високих напруг: навчальний посібник [Електронне видання]. – Рівне : НУВГП, 2018. – 187 с.

5. Козирський В. В. Електропостачання агропромислового комплексу / В. В. Козирський, В. В. Каплун, С. М. Волошин – К.: Аграрна освіта, 2011- 448 с.

Використання напівпровідникових плівок

Якщо електрод має гострий край і знаходиться в контакті з іншим видом ізоляції (газової, рідкої або твердої), напруженість електричного поля між ними зростає завдяки різним діелектричним проникностям ϵ цих матеріалів. Для запобігання цьому застосовують напівпровідникові покриття, які дають змогу зменшити складову напруженості електричного поля E_x , спрямовану уздовж поверхні твердої ізоляції (рис. 3.1).

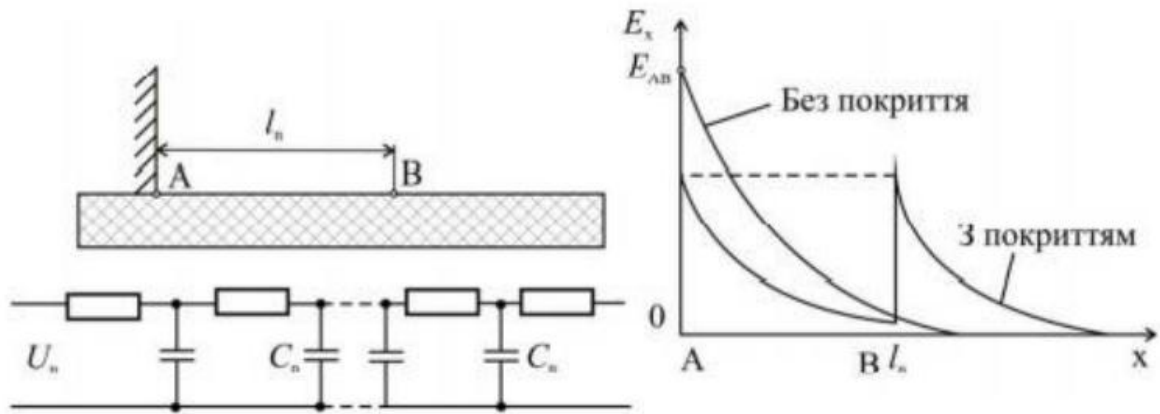


Рисунок 3. 1 – Регулювання електричного поля за допомогою напівпровідникових плівок

Зміна потенціалу й напруженості E_x уздовж поверхні твердої ізоляції визначається питомим поверхневим опором ρ_s і питомою поверхневою

$$\text{ємністю } C_{нов} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_T}{d},$$

де d – товщина ізоляції;

ϵ_T – відносна діелектрична проникність твердого діелектрика.

За допомогою схеми заміщення визначасмо найбільшу напруженість у точці А:

$$E_A = U_n \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \rho_s \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_T}{d}},$$

де U_n – напруга, прикладена до ізоляції.

При застосуванні напівпровідникового покриття з поверхневим опором $\rho_n < \rho_s$ напруженість в точці А дорівнюватиме:

$$E_A = U_n \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \rho_n \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_T}{d}},$$

– тобто зменшиться в $\sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_s}}$ разів.

Корона на проводах ПЛ

Якісно фізичний процес виникнення коронного розряду обумовлений наявністю високої напруженості електричного поля E біля загостреного

електрода (проводу) і градієнту потенціалу в міжелектродному проміжку:

$$E_x = -grad_x \varphi = \frac{d\varphi}{dx}. \quad (3. 1)$$

Ця висока напруженість може бути достатньою для виникнення самостійного розряду в локальній зоні міжелектродного проміжку. Фазна напруга

ПЛ-110 кВ, між землею та проводом дорівнює: $\frac{110}{\sqrt{3}}$ кВ. При великій відстані

проводів до землі цієї напруги недостатньо для виникнення повного розряду.

Однак на поверхні проводу завдяки високому градієнту потенціалу, напруженість перевищує 25÷30 кВ/см, що більше значення початкової напруженості для повітря – 24,5 кВ/см, і тут виникає самостійний розряд – корона.

Початкову напруженість появи корони обчислюють за формулою:

$$E_{нк} = 24,5 \cdot \delta \cdot \bar{m} \cdot \left[1 + r \frac{0,65}{(r \cdot \delta)^{0,38}} \right], \quad (3. 2)$$

а при малих радіусах r проводів використовують формулу Піка:

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

Коефіцієнт \bar{m} – характеризує негладкість поверхні проводу. За сухої погоди для кручених проводів, які застосовують на ПЛ, $\bar{m} \cong 0,85$.

В умовах туману $\bar{m} \cong 0,7$ і корона виникає при меншій напруженості електричного поля. Іній, ожеледь, паморозь призводять до утворення на поверхні проводу кристалів льоду, які мають форму голок. Тому в цьому випадку $\bar{m} \cong 0,6$. Дощ та мокрий сніг збільшують витрати електроенергії на корону в залежності від інтенсивності опадів J_1 , яка вимірюється в одиницях [мм/год] та звичайно змінюється в діапазоні від 0,1 до 3 мм/год. Для цього випадку залежність \bar{m} від інтенсивності опадів J_1 може бути надано формулою:

$$\bar{m} = 0,73 - 0,115 (\lg J_1 + 1). \quad (3. 4)$$

Найбільший вплив на коронування проводів ПЛ визиває сухий сніг. Тому для сухого снігу з інтенсивністю опадів $J_{сн}$ значення \bar{m} розраховується за формулою (3. 4) з підстановкою $J_1 = 3J_{сн}$.

Якщо робоча напруженість на поверхні проводу ПЛ $E_p \geq 0,5 \cdot E_{нк}$, то втрати на корону значні і їх необхідно обмежувати.

Основним способом зменшення втрат на корону є збільшення діаметра проводу, що приведе до зменшення напруженості поля навколо нього.

Обмеження корони на проводах ПЛ досягають двома основними способами:

- розщепленням проводів фаз;
- розширенням проводів – замість сталевий центральної жили застосовують пластикову або іншу непровідну (вуглепластикову) жилу, а провідникові сегменти розташовують по її периметру.

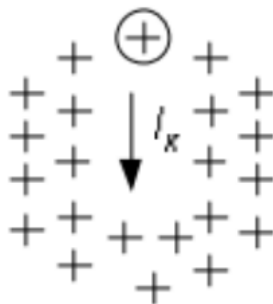


Рисунок 3.2 – Утворення об'ємного заряду біля проводу і струму корони.

При коронному розряді в результаті іонізації повітря біля поверхні проводу утворюється об'ємний заряд того ж знаку, що і потенціал проводу (рис. 3.2). Напруженість поля біля поверхні проводу під час коронування залишається рівною $E_{пк}$. Збільшення напруги на проводі призводить до посилення іонізації, зростання об'ємного заряду і зниження напруженості до $E_{пк}$. При збільшенні напруженості поля об'ємного заряду втрати енергії на корону зростають тим більше, чим більше напруга на проводі перевершує початкову напругу корони, яка пов'язана з $E_{пк}$.

Оскільки об'ємні заряди переміщуються від проводу в напрямку до землі, напруженість поля біля проводу зростає. Але через посилення іонізації об'ємний заряд поповнюється, напруженість падає до $E_{пк}$ і корона зберігається. При змінній напрузі об'ємні заряди здійснюють зворотно-поступальні коливання біля проводу, поступово віддаляючись від нього в ділянку слабого поля, де вони рекомбінують. На проводах малих (до 1 см) діаметрів корона виникає в лавинній формі.

Але при збільшенні напруги понад початкову розмір зони іонізації зростає і корона переходить у стримерну форму. Струм стримерної корони складається з окремих імпульсів з дуже крутими фронтами (~ десятки наносекунд). Ця високочастотна складова струму корони є джерелом інтенсивного електромагнітного випромінювання із широким спектром частот, що створює перешкоди радіо- і телевізійному прийому.

При змінній напрузі корона виникає, якщо напруженість поля на проводі досягає $E_{пк}$ і горить, поки напруга не досягне максимуму. Потім, зі зниженням напруги напруженість поля на проводі спадає та стає нижче $E_{пк}$, і ко-

рона згасає. Графіки зміни напруги, напруженості поля та струму корони наведені на рис. 3. 3.

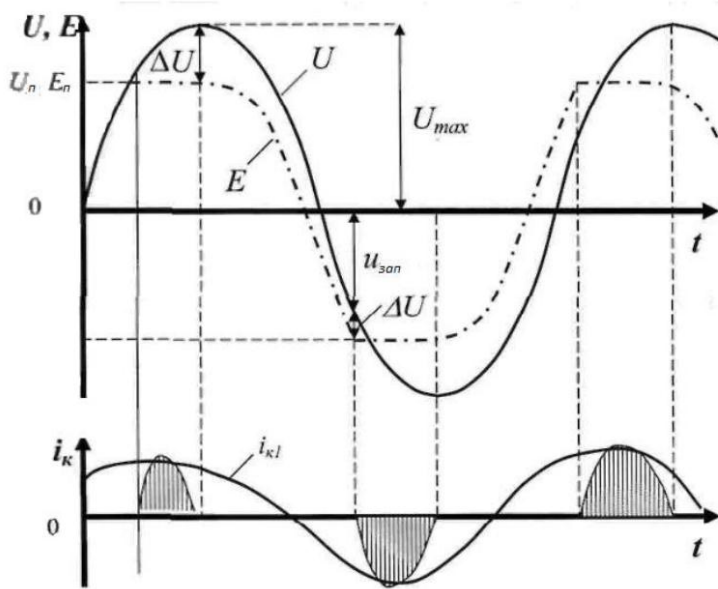


Рисунок 3. 3 – Графіки зміни напруги, напруженості поля та струму корони (i_{k1} – перша гармоніка струму корони)

Оскільки позитивні іони малорухомі, то в кожен позитивний напівперіод змінної напруги об'ємний заряд підсилюється і потім (в негативний період) корона запалюється раніше.

Негативний об'ємний заряд завдяки більшій рухливості електронів, що прямують в напрямку до землі, – менший, він менше підсилює напруженість поля, тому напруга запалювання корони в позитивний напівперіод вища. Також при змінній напрузі коронування більш інтенсивне, і втрати на корону значно більші, ніж при постійній (рис. 3. 4).

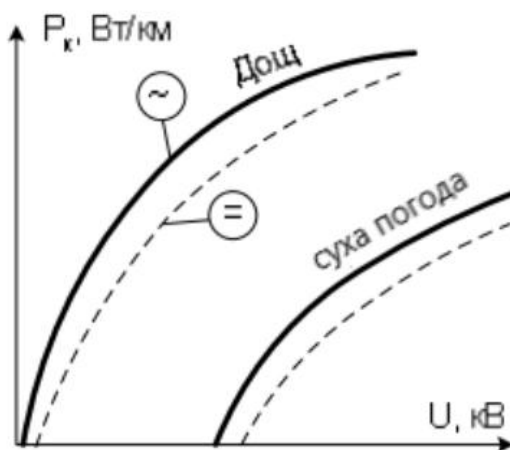


Рисунок 3. 4 – Втрати потужності від корони при змінній та постійній напрузі.

Основні втрати електроенергії від коронного розряду обумовлені переміщенням об'ємного заряду до землі, оскільки втрати на іонізацію на порядок менші.

Для того, щоб зменшити втрати електроенергії від корони, а також (що не менш важливо) радіоперешкоди, початкова напруга запалювання корони повинна бути не нижча найбільшої робочої напруги лінії щодо землі.

Як показують розрахунки, діаметр проводів для ПЛ-110 кВ за вимогою відсутності корони повинен бути $\geq 1,2$ см, а для ПЛ-220 кВ $\geq 2,4$ см при нормальних умовах та сухої погоди. Для ПЛ-330 кВ необхідні проводи більшого діаметра.

Ця вимога реалізується в так званих розширених проводах, в яких струмопровідні сегменти розташовані по периметру непровідної центральної серцевини. Застосовують також розщеплення фаз – коли кожна фаза лінії складається не з одного, а з декількох проводів (n) меншого діаметра (рис. 3. 5). Це дозволяє при необхідному сумарному перерізі проводів істотно знизити максимальну напруженість поля на їхній поверхні. При цьому заряд кожного проводу q_1 складає тільки частину загального заряду розщепленої фази q_ϕ :

$$q_1 = \frac{q_\phi}{n} = \frac{C_{р\phi} \cdot U_\phi}{n}, \quad (3. 5)$$

де n – число проводів у фазі;

$C_{р\phi}$ – ємність одиниці довжини проводу розщепленої фази.

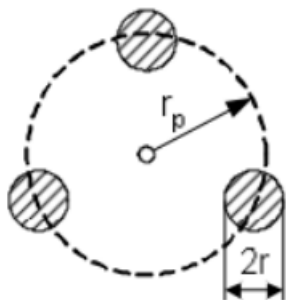


Рисунок 3. 5 – Характеристики розщепленої фази.

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

$$C_{р\phi} = \frac{2\pi \cdot \epsilon_0}{\ln \frac{L_{сг}}{r_e}}, \quad (3. 6)$$

де $L_{сг}$ – середня геометрична відстань між фазами, яка для горизонтального розташування фазних проводів складає

$$L_{сг} = \sqrt[3]{2L^3} = 1,26L,$$

де L – геометрична відстань між центрами фазних проводів ПЛ;

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

ємність, що і розщеплена фаза. Визначена за формулою (3.6) ємність відноситься до крайніх фаз ПЛ, а ємність середньої фази можна вважати на 5% більшою.

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

$$E_{cp} = \frac{q_1}{(2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r)} = \frac{U_\phi}{(n \cdot r \cdot \ln \frac{L_{CF}}{r_e})}, \quad (3.7)$$

а максимальна:

$$E_{max} = k_n \cdot E_{cp} = f(n, r_p), \quad (3.8)$$

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

поля через вплив зарядів на сусідніх проводах розщепленої фази (рис. 3.6).

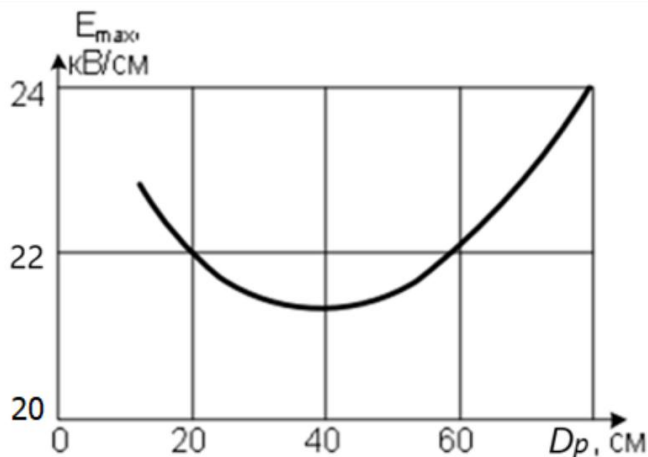


Рисунок 3. 6 – Залежність максимальної напруженості електричного поля розщепленої фази від відстані D_p *) між проводами ПЛ-500кВ ($n=3$)

*) На практиці розщеплення проводів частіше характеризується відстанню D_p між розщепленими проводами фази (по їх осям), взаємозв'язок якої з іншими параметрами можна представити у табличному виді:

При збільшенні r_p зменшується вплив зарядів сусідніх проводів, але збільшується ємність фази і її заряд. Таким чином, існує оптимальний радіус розщеплення, при якому E_{max} – найменша. Отже з (3. 8) випливає, що мінімальне значення напруженості E_{max} визначається оптимальним радіусом розщеплення r_p і числом одиночних проводів n .

Число проводів у фазі n	2	3	5
Радіус розщеплення r_p	$\frac{D_p}{2}$	$\frac{D_p}{\sqrt{3}}$	$0,85D_p$
Еквівалентний радіус r_e	$\sqrt{rD_p}$	$\sqrt[3]{rD_p^2}$	$1,21\sqrt[5]{rD_p^4}$
Коефіцієнт посилення поля k_n	$1 + 2\frac{r}{D_p}$	$1 + 2\sqrt{3}\frac{r}{D_p}$	$1 + 4,7\frac{r}{D_p}$

Наявність корони на проводах ПЛ є негативним явищем з таких причин:

- струм коронного розряду – імпульсний зі спектром частот від 0,15 до 1000 МГц, що створює перешкоди у всьому радіо- та теледіапазоні;
- акустичний шум шкідливий для людини і вимагає збільшення зони відчуження ПЛ;
- корона супроводжується створенням поблизу проводів ПЛ і переміщенням до землі об'ємних зарядів, що викликає активні втрати електроенергії, які досягають ~ 40% (і більше) втрат від нагріву проводів.

Однак збільшенням діаметру проводів і зниженням напруженості поля на їхній поверхні неможливо виключити корону при несприятливих атмосферних умовах. В місцях пошкодження проводів і арматури гірлянд, на елементах кріплення (тобто в зонах місцевого посилення поля) навіть в нормальних умовах може виникнути місцева корона.

На лінії, якщо робоча напруга перевищує початкову: $U_p > U_{пк}$, виникає загальна корона.

Для розрахунку втрат на корону вводиться поняття критичної напруженості електричного поля

$$E_k = 23,3 \cdot \delta \cdot \bar{m} \cdot \left[1 + \frac{0,62}{(r \cdot \delta)^{0,38}} \right], \text{ кВ/см} \quad (3.9)$$

де r – радіус проводу в [см].

Для кожної фази ПЛ та для кожного виду погоди можна визначити відповідну критичну напругу

$$U_k = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot n \cdot r \cdot E_k}{k_n \cdot C_{рф}} \quad (3.10)$$

з урахуванням того, що для ПЛ-330 кВ $n = 2$; для ПЛ-500 кВ $n = 3$; для ПЛ-750 кВ $n = 5$, причому для середньої фази ємність $C_{рф}$ за (3.6) збільшується на 5%.

За результатами досліджень проф. В. І. Левітова питомі втрати на корону в [кВт/км·фаза] можна розрахувати за формулою:

$$P = 350 \cdot \omega \cdot \frac{C_{p\phi}^2}{C_e - C_{p\phi}} \cdot U_{\kappa}^2 \cdot F\left(\frac{U_{\phi a}}{U_{\kappa}}\right), \quad (3.11)$$

де U_{κ} – критичне значення напруги для кожного виду погоди та даної фази (кВ);

$U_{\phi a}$ – амплітуда фазної напруги лінії (кВ);

$C_{p\phi}$ – ємність тієї фази лінії, для якої визначають втрати;

C_e – еквівалентна ємність об'ємного заряду корони [Φ / км], яка визначається

$$\text{як } C_e = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0}{\ln \frac{\sqrt{r_p^2 + 2,5 \cdot k \cdot C_{p\phi} \cdot U_{\kappa}} / \delta \cdot \varepsilon_0 \cdot \omega}{r_e}}, \quad (3.12)$$

де r_e – еквівалентний радіус розщепленого проводу;

r_p – радіус розщеплення;

k – рухливість іонів, яка для сухої погоди, інею, ожеледі та паморозі складає $2200 \text{ см}^2 / \text{кВ} \cdot \text{с}$, а для туману, дощу, мокрого та сухого снігу – $1100 \text{ см}^2 / \text{кВ} \cdot \text{с}$;

δ – відносна густина повітря;

$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/км}$ – діелектрична проникність повітря;

ω – кутова (кругова) частота змінного струму $\omega = 2\pi f$,

де $f = 50 \text{ Гц}$ (60 Гц)

Функція $F\left(\frac{U_{\phi a}}{U_{\kappa}}\right)$ може бути представлена в табличному вигляді:

$U_{\phi a} / U_{\kappa}$	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
F	0,01	0,025	0,055	0,13	0,25	0,40	0,60

При цьому, в проміжних інтервалах $F\left(\frac{U_{\phi a}}{U_{\kappa}}\right) = c$, $a < c < b$, значення $F(c)$

можна розрахувати за формулою

$$\lg F(c) = \lg F(a) + \frac{\lg F(b) - \lg F(a)}{b - a} (c - a). \quad (3.13)$$

За формулами (9) – (13) розраховуються питомі втрати на корону для кожної фази та виду погоди при певному значення амплітуди фазної напруги лінії $U_{\phi a}$. Питомі втрати підсумовуються по фазах та перемножуються на довжину лінії. Таким чином можуть бути розраховані сумарні втрати на корону в залежності від напруги лінії та виду погоди. Різне зростання функції F від

відношення $\frac{U_{\text{фа}}}{U_{\text{к}}}$ враховує збільшення втрат на корону при несприятливих

погодних умовах (коли зменшуються відповідні значення $E_{\text{к}}, U_{\text{к}}$). Середньорічні втрати на корону ПЛ визначають з урахуванням тривалості (за рік) тих або інших видів погоди, яка для України орієнтовно складає (більш точно необхідно визначати за метеорологічними даними для області розташування ПЛ):

- суха погода – 7126 годин;
- сухий сніг – 800 годин;
- дощ – 500 годин;
- іній, ожеледь, паморозь – 340 годин.

Екологічний вплив коронного розряду на лініях електропередавання створює перешкоди радіо- та телевізійному прийманню, мобільному зв'язку, а також акустичний шум. Основною причиною радіоперешкод та шуму є стримерна корона на струмопроводах ПЛ. Екологічні питання впливу ПЛ вивчаються у відповідних екологічних дисциплінах.

Питання для контролю

1. Максимальна напруженість поля вздовж поверхні твердого діелектрика при використанні напівпровідникової плівки.
2. Формула Піка.
3. Початкова напруженість появи корони на проводах ПЛ.
4. Коефіцієнт негладкості поверхні проводу ПЛ за умов сухої погоди, туману.
5. Коефіцієнт негладкості поверхні проводу за умов інею, ожеледі, паморозі.
6. Коефіцієнт негладкості поверхні проводу за умов дощу, мокрого снігу.
7. Коефіцієнт негладкості поверхні проводу за умов сухого снігу.
8. Як змінюється напруженість поля у часі на поверхні проводу при коронуванні ПЛ на змінній напрузі?
9. Порівняйте інтенсивність корони на змінній та постійній напрузі при однакових амплітудних значеннях напруги.
10. Порівняйте напругу запалювання корони змінного струму за позитивної та негативної полярності.
11. Чим відрізняється розширення проводу ПЛ від розщеплення?
12. Ємність розщепленої фази надвисокої напруги.
13. Еквівалентний радіус розщепленої фази.
14. Середня напруженість електричного поля на поверхні проводів розщепленої фази.

ЛЕКЦІЯ № 4. ОСНОВНІ ВИДИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ. КОНФІГУРАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ. ВИСОКОВОЛЬТНА ІЗО- ЛЯЦІЯ

- 1. Причини старіння ізоляції при тривалому впливі $U_{роб}$.**
- 2. Розподілення ізоляторів за призначенням.**
- 3. Розподілення ізоляторів за конструктивним виконанням.**
- 4. Високовольтні ізолятори.**
- 5. Ізоляція введів.**
- 6. Ізоляція високовольтних конденсаторів.**
- 7. Ізоляція трансформаторів.**
- 8. Ізоляція кабельних ліній.**
- 9. Ізоляція електричних машин.**
- 10. Профілактика ізоляції.**

ЛІТЕРАТУРА

- 1. Правила улаштування електроустановок. - Видання офіційне. Міненерговугілля України. - Х. : Видавництво «Форт», 2017. - 760 с. 6.**
- 2. Важов В. Ф. Техніка високих напруг: курс лекцій / В. Ф. Важов, В. А. Лавринович. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 150 с.**
- 3. Василець С. В., Василець К. С. Техніка високих напруг: навчальний посібник [Електронне видання]. – Рівне : НУВГП, 2018. – 187 с.**
- 4. Козирський В. В. Електропостачання агропромислового комплексу / В. В. Козирський, В. В. Каплун, С. М. Волошин – К.: Аграрна освіта, 2011- 448 с.**
- 5. Притока І. П. Електропостачання сільського господарства / І. П. Притока, Б. В. Мозирський. – Київ: Урожай, 1995 р. - 333 с.**

Енергетична система повинна працювати надійно. Для забезпечення надійності роботи електричної системи необхідно, щоб кожен елемент системи працював надійно: генератори, трансформатори, комутаційна апаратура, пристрої компенсування та іншого електроустаткування.

Вирішення цього завдання в основному досягається шляхом надійної роботи ізоляції електричних систем та обладнання при всіх напругах, що постійно на них впливають .

Ізоляція електроустановок поділяється **на зовнішню та внутрішню.**

До зовнішньої ізоляції відносяться повітряні проміжки (наприклад, між проводами різних фаз ЛЕП), зовнішні поверхні твердої ізоляції (ізоляторів), а також проміжки повітря між контактами роз'єднувача та т. д. Осно-

вною особливістю зовнішньої (повітряної) ізоляції є залежність її електричної міцності від атмосферних умов: тиску, температури та вологості повітря. На електричну міцність ізоляторів зовнішньої установки істотно впливають забруднення їх поверхні та атмосферні опади.

До внутрішньої ізоляції відноситься ізоляція обмоток трансформаторів та електричних машин, ізоляція кабелів, герметизована ізоляція вводів та т. д. Внутрішня ізоляція є комбінацією твердого і рідкого діелектриків (наприклад, у трансформаторах) або твердого та газоподібного діелектриків (наприклад, у герметизованих розподільчих пристроях з елегазовою ізоляцією). Електрична міцність внутрішньої ізоляції електроустаткування практично не схильна до впливу атмосферних умов. Її особливістю є старіння, тобто погіршення електричних характеристик у процесі експлуатації.

Повітряна (зовнішня) ізоляція після пробою повністю самовідновлюється, якщо знімається напруга або гасне дуга у місці пробою. Пробой твердої та комбінованої ізоляції - явище незворотне, що веде до виходу з ладу електроустаткування.

Рідка та внутрішня газова ізоляція самовідновлюється, проте пробої призводять до погіршення їх характеристик. Тому стан внутрішньої ізоляції контролюється під час експлуатації, для того щоб виявити дефекти, що розвиваються в ній, і запобігти аварійній відмові електрообладнання.

Основні вимоги до ізоляції електроустаткування:

- 1) необхідний ресурс (термін служби) під час робочої напруги;
- 2) достатня електрична міцність при дії внутрішніх та зовнішніх перенапруг;
- 3) достатня механічна міцність при всіх можливих робочих і аварійних навантаженнях;
- 4) необхідна надійність;
- 5) мінімальна вартість;
- 6) мінімальні розміри та маса;
- 7) технологічність виготовлення ізоляції та всього обладнання в цілому;
- 8) простота ремонту;
- 9) безпеку обслуговування;
- 10) екологічна безпека.

На електричне обладнання, що працює в електричних мережах, впливають: робоча напруга, внутрішні та грозові перенапруги.

Відповідно до цього електроустаткування поділяється на класи напруги.

Клас напруги співпадає з номінальною лінійною напругою електричної мережі, для роботи в якій призначено електроустановку.

Для кожного класу напруги стандартами встановлено найбільша робоча лінійна напруга $U_{роб.найб}$ частоти 50 Гц(згідно з ДСТУ EN 50160:2014 за ПУЕ), необмежено тривале прикладення якої допустиме за умов нормальної роботи електроустаткування та його ізоляції:

$$U_{роб.макс} = k_p \cdot U_n, \quad (4. 1)$$

де k_p - кратність робочої напруги;

U_n - номінальна напруга мережі.

У процесі експлуатації електричне обладнання піддається підвищенням напруги понад робоче – внутрішньою або зовнішньою перенапругою.

Перенапруги характеризуються:

1) максимальним значенням $U_{т.макс}$ або кратністю k_n по відношенню до амплітуди найбільшої робочої фазної напруги:

$$k_n = \frac{U_{макс}}{\sqrt{2}U_{роб.ф.макс}};$$

2) тривалістю дії;

3) формою кривої напруги;

4) частотою дії;

5) шириною охоплення мережі, під якою розуміється кількість ізоляційних конструкцій, на які одночасно впливає даний вид перенапруги.

Розрізняють такі **види внутрішніх перенапруг:**

режимні(квазістаціонарні) та комутаційні.

До **режимних перенапруг** відносяться перенапруги на розімкненому кінці односторонньо включеної «холостої» лінії, резонансні перенапруги на основній частоті та вищих гармонійних, ферорезонанс, параметричний резонанс.

Режимні перенапруги характеризуються невисокою кратністю ($k_n \leq 1,5 - 2,0$) та відносною довготривалістю – від часток секунд до десятків хвилин.

Комутаційні перенапруги обумовлені включенням або відключенням ліній або елементів обладнання, замикання на землю або між фазами, відключенням к.з.. Ці перенапруги характеризуються більшою кратністю (k_n досягає значень 3-4,5 і більше) і меншою тривалістю - найчастіше один чи кілька на півперіодів промислової частоти.

Максимальні значення та тривалість перенапруг залежать від ряду випадкових факторів: виду комутації, характеристик комутуваного апарату, фази початку процесу, потужності підстанції та ін. Повітряні мережі внаслідок великої протяжності часто уражаються блискавкою. При цьому на ізоляції ліній виникають зовнішні (грозові) перенапруги, які витримати ізоляція не

може. Відбувається пробій повітря вздовж гірлянди ізоляторів, що переходить у підтримуваний джерелом робочої напруги дуговий розряд.

Крім порушення ізоляції повітряних ліній, удари блискавки призводять до появи на проводах імпульсів високої напруги, які по проводах досягають підстанцій і впливають на встановлене там електроустаткування. Значення грозових перенапруг залежать від інтенсивності ударів блискавки та характеристик уражених об'єктів.

З вищевикладеного виникає необхідність у чисельних оцінках електричної міцності ізоляції з урахуванням розрахункових моделей, що допомагають виявити закономірності розвитку розряду у різних середовищах.

Конфігурація електричних полів

Діелектрики служать для ізоляції струмопровідних електродів різної полярності один від одного. Електроди, які необхідно ізолювати (шини розподільних пристроїв, провода ліній електропередач, зовнішні струмоведучі частини електричних апаратів тощо) створюють електричні поля різної конфігурації. Від форми електричного поля залежить електрична міцність та пробивна напруга.

Форми електричних полів поділяються на:

однорідні, слабо неоднорідні та різко неоднорідні.

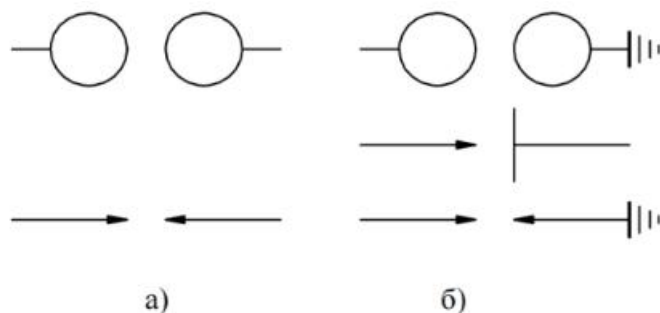


Рисунок 4. 1 - Форми електричних полів: а) - симетрична система електродів; б) – несиметрична система електродів.

Однорідне поле створюють два пласко паралельні електроди, **слабо неоднорідне поле** виникає в системі електродів шар-куля (рис. 4. 1) при відстані між електродами S менше діаметра кулі D , **різко неоднорідне поле** - при електродах стрижень-площина або стрижень-стрижень.

Степінь неоднорідності електричного поля між електродами характеризується коефіцієнтом неоднорідності \hat{E}_i , який дорівнює відношенню максимальної напруженості електричного поля E_{max} до середньої напруженості $E_{сн}$ між електродами:

$$\hat{E}_i = \frac{A_{max}}{E_{сн.}}. \quad (4. 2)$$

Середня напруженість - це відношення напруги U , доданої до електродів, до відстані між електродами, S :

$$E_{сн.} = \frac{U}{S}. \quad (4. 3)$$

Максимальна напруженість залежить від прикладеної до електродів напруги, конфігурації, розмірів електродів та відстані між ними. Наприклад, для коаксіальних циліндрів (кабель) максимальна напруженість визначається (рис. 4. 2) :

$$E_{max} = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{R}{r}}, \quad (4. 4)$$

а середня напруженість:

$$E_{сн} = \frac{U}{R \cdot r}, \quad (4. 5)$$

де U - прикладена напруга, кВ;

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

R - внутрішній радіус зовнішнього циліндра (обплетення кабелю), см.

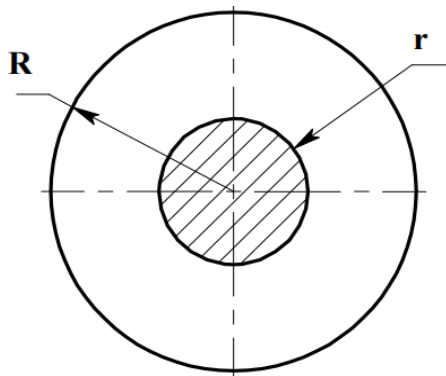


Рисунок 4. 2 - Схема коаксіальних електродів.

Підставивши формули (4. 4) і (4.5) в (1. 2), отримуємо:

$$\hat{E}_i = \frac{R \cdot r}{r \cdot \ln \frac{R}{r}}. \quad (4. 6)$$

Отже, коефіцієнт неоднорідності \hat{E}_i залежить від геометричних розмірів електродів.

Для однорідного поля коефіцієнт неоднорідності $\hat{E}_i=1$, для слабо неоднорідного - $\hat{E}_i \leq 3$, для різко неоднорідного - $\hat{E}_i > 3$.

Крім цього розрізняють **симетричну та несиметричну систему електродів**.

Симетрична форма - електроди мають однакову форму та розміри та відсутнє заземлення будь-якого з них (рисунок 4. 1., а).

Несиметрична форма - електроди мають різну конфігурацію, розміри чи один із них заземлений (рисунок 4. 1.,б).

Пробивні напруги в несиметричній системі електродів нижче, ніж у симетричній.

Причини старіння ізоляції:

- 1) електричні - часткові розряди, трекінг, зміна γ , $tg\delta$;
- 2) теплові – прискорення хімічних реакцій, збільшення $tg\delta$, зменшення ρ ;
- 3) механічні – тріщини, втома, руйнація;
- 4) хімічні – окислення, утворення радикалів тощо;
- 5) зовнішнє середовище – волога, ультрафіолетові промені, температура.

Високовольтні ізолятори

За призначенням ізолятори поділяється на лінійні та станційно-апаратні, які, у свою чергу, діляться на опорні та прохідні.

Лінійні ізолятори

Лінійні ізолятори застосовуються для кріплення та ізолювання проводів та тросів повітряних ліній електропередавання.

За конструктивним виконанням вони діляться на штирьові і підвісні.

Штирьові ізолятори виготовляються з електротехнічної порцеляни або скла і монтуються на опорах за допомогою штирів або гаків. Вони випускаються різного конструктивного виконання. Позначення, наприклад, ШФ10-В – штирьовий, порцеляновий (фарфоровий), на номінальну напругу 10 кВ, конструктивне виконання (всього існує три варіанти конструктивного виконання - А, Б, В). Випускаються промисловістю на напругу до 35 кВ.

Підвісні ізолятори застосовуються для напруги більше 35 кВ.

Поділяються на тарілчасті (шарнірні) та стрижневі. Виготовляються з електротехнічної порцеляни, скла і полімерних матеріалів.

На рис. 4.3 приведена конструкція підвісного тарілчастого ізолятора. Шапка (2) і стрижень (3) забезпечують шарнірне з'єднання одного ізолятора з іншим під час збирання ізоляторів у гірлянди. Ізолятори відчувають тільки зусилля, що розтягують, але, завдяки конструктивному виконанню, головка

(5) ізолятора працює на стиск і тому витримує дуже великі механічні навантаження (до 30...50 тс).

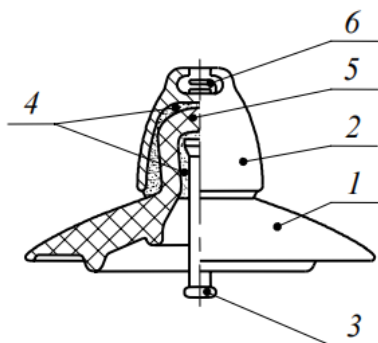


Рисунок 4.3 - Підвісний шарнірний ізолятор із конусною головкою:
1 – тарілка ізолятора; 2 – чавунна шапка; 3 – сталевий стрижень; 4 – цементна замазка; 5 – головка ізолятора; 6 – замок.

Тонна-сила (позначення: тс; міжнародне: *tf*):

$$1 \text{ тс} = 103 \text{ кгс} = 9806,65 \text{ Н};$$

грам-сила (позначення: гс; міжнародне: *gf*):

$$1 \text{ гс} = 10^{-3} \text{ кгс} = 9,80665 \cdot 10^{-3} \text{ Н}.$$

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

Підвісні стрижневі ізолятори виготовляються з електротехнічної порцеляни, скла, ситалу, скловолокна з полімерним покриттям. Один ізолятор може замінити гірлянду із 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 поверхневого перекриття.

Позначення ізолятора, наприклад 61 СФ-110/2,25: стрижневий, порцеляновий(фарфоровий), номінальна напруга 110 кВ, мінімальне руйнівне навантаження – 2,25 тс.

Станційно-апаратні ізолятори

Опорні ізолятори призначені для кріплення шино проводів, деталей апаратів та ізолювання їх від заземлених конструкцій та між собою. Виготовляють їх для зовнішньої та внутрішньої установки на напругу до 110 кВ. На більшу напругу опорні ізолятори збирають в колони.

Опорні ізолятори для зовнішньої установки поділяються на *штирвові та стрижневі*. Штирвові ізолятори використовуються в тих випадках,

коли потрібна велика механічна міцність на вигин, виготовляються з електротехнічної порцеляни(фарфору).

Позначення, наприклад, ОНШ-35-2000: опорний, зовнішньої установки, штирковий, номінальна напруга – 35 кВ, мінімальне руйнівне навантаження – 2000 кгс.

Позначення ізолятора, наприклад 61СФ-110/2,25: стрижневий, порцеляновий(фарфоровий), номінальна напруга 110 кВ, мінімальне руйнівне навантаження – 2,25 тс.

Опорно-стрижневі ізолятори виготовляються на напругу 35...150 кВ із електротехнічної порцеляни. Кінці ізолятора армовані чавунними фланцями. Позначення, наприклад, ОНС-110-1000: опорний, зовнішньої установки, стрижневий, номінальна напруга 110 кВ, мінімальна механічна міцність – 1000 кгс.

Прохідні ізолятори та вводи використовуються там, де струмопровідні частини проходять через стіни, перекриття будівель, огороження електроустановок або вводяться всередину металевих корпусів обладнання.

Прохідними ізоляторами називають ізолятори на напругу до 35 кВ, на напругу 110 кВ та вище – вводи. Вводи мають складнішу конструкцію ізоляції і виконуються з масло бар'єрною ізоляцією (до 150 кВ) або з паперово-масляною ізоляцією (220 кВ і вище).

Прохідні ізолятори на високу напругу (до 35 кВ включно) виготовляються з електротехнічної порцеляни, скла, бакелітового паперу. На рис. 4. 4 наведено конструктивну схему прохідного ізолятора.

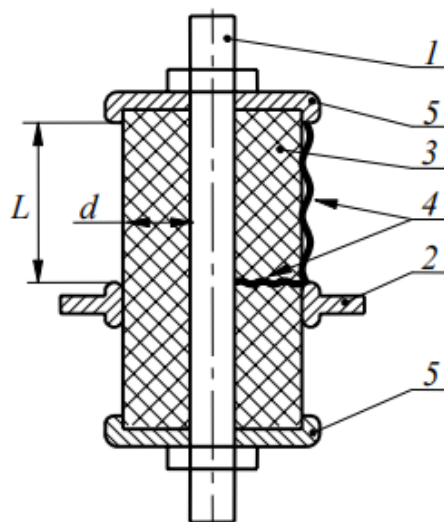


Рисунок 4. 4 - Конструктивна схема прохідного ізолятора:
1 – струмопровідний стрижень (труба); 2 – заземлений фланець;
3 – тверда ізоляція; 4 - шляхи пробую ($U_{np} > U_{nep}$);
5 – високовольтні фланці.

Для збільшення напруги перекриття $U_{пер}$ на зовнішній поверхні ізолятора роблять ребра, а також збільшують діаметр ізолятора біля заземленого фланця. Прохідні ізолятори маркуються за напругою, струмом та згинальним механічним навантаженням.

Наприклад, П-10/400-750, що означає: прохідний ізолятор, $U_n = 10$ кВ, $I_n = 400$ А, $P_{виг} = 750$ кгс.

Вводи – це прохідні ізолятори на 110 кВ і вище.

Вони містять зовнішню та внутрішню ізоляцію складної конструкції. Зовнішньою ізоляцією є порцелянова покривка. Внутрішня – ділянки ізоляції у тілі вводу.

Вводи бувають двох типів: масло бар'єрні та паперово-олійні (для $U_n \geq 220$ кВ).

1) **Масло бар'єрний ввід** 110...150 кВ конденсаторного типу (див. рис. 4.5). Щоб підвищити $U_{пр}$ розбивають проміжок на n малих проміжків бар'єрами 5 і вирівнюють поле металевими обкладками (фольга на бар'єрах). В результаті $U_{пр}$ підвищується $\sim 2,5$ рази.

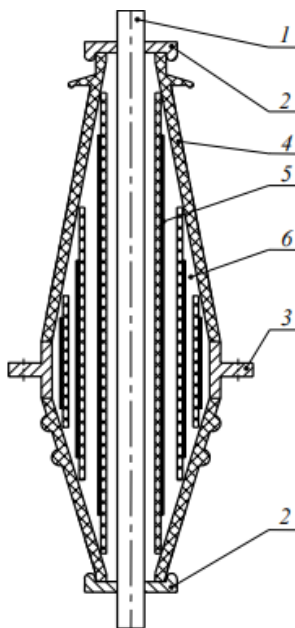


Рисунок 4.5 - Конструктивна схема масло бар'єрного вводу:

- 1 – струмопровід(стрижень); 2 – високовольний фланець;
- 3 – заземлений фланець; 4 – порцелянова сорочка; 5 – бар'єри з обкладкою;
- 6 – масло.

Обкладки вирівнюють поле в радіальному та аксіальному напрямках. Найбільш важливо вирівняти поле в аксіальному напрямку зменшення довжини вводу. Для цього уступи роблять однаковими.

На рис. 4. 6 наведено епюри розподілу напруженостей електричного поля в радіальному (а) та аксіальному (б) напрямках масло бар'єрного вводу. Струмopровідний стрижень обмотується кількома шарами паперу. Основну електричну міцність ізоляції вводу забезпечує масло, що знаходиться всередині покришки.

2) **Паперово-масляний ввід** конденсаторного типу на клас напруги $U \geq 220$ кВ.

Ввід виготовляється шляхом намотування на струмопровідний стрижень (або трубу) ізоляційного тіла з паперу. Через кожні 2...4 мм намотування паперу в тіло закладаються конденсаторні обкладки з алюмінієвої фольги для вирівнювання поля в осьовому та радіальному напрямках. Після намотування тіло просочується маслом у вакуумі, а після складання вводу герметизується.

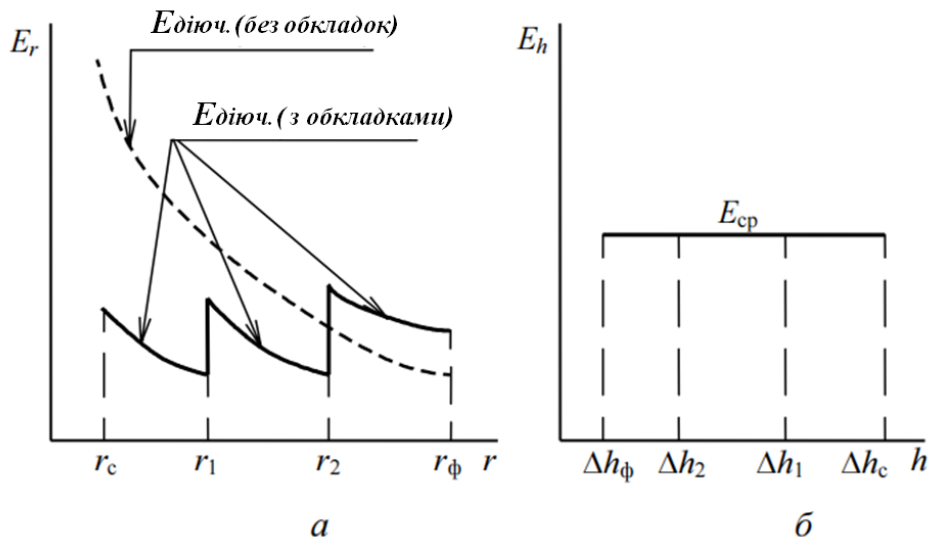


Рисунок 4. 6 - Розподіл напруженості електричного поля у радіальному (а) та аксіальному (б) напрямках вводу:

r_c - радіус струмопроводу (стрижня); r_1 - радіус першої обкладки (фольги); r_2 - радіус другої обкладки (фольги); r_ϕ - радіус обкладки у фланця (заземлена); Δh_c - довжина уступу ізоляції у стрижня; Δh_1 - довжина уступу першому бар'єрі; Δh_2 - довжина уступу на другому бар'єрі; Δh_ϕ - довжина уступу на бар'єрі біля фланця

Ізоляція високовольтних конденсаторів

Призначення конденсаторів:

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

В якості ізоляції використовуються: газ, рідини, тверді неорганічні матеріали, тверді органічні матеріали.

Тверда ізоляція у високовольтних конденсаторах (частіше органічна) - папір, плівки з просоченням маслом.

Конденсатор характеризується питомою енергією, що запасється, наприклад Дж/дм³ :

$$W_{\text{пит}} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E_p^2}{2} \varepsilon. \quad (4.7)$$

Високовольтні конденсатори різного призначення, різних номінальних напруг та реактивної потужності влаштовані однаково: складаються з пакетів секцій, з'єднаних послідовно-паралельно та розташованих у герметизованому корпусі, залитому просочувальною рідиною.

Основним елементом будь-якого силового конденсатора є секція – спірально намотаний рулон зі стрічок діелектрика та алюмінієвих обкладок, що виконують роль електродів (рис. 4.7). Секції після намотування сплющують зменшення обсягу.

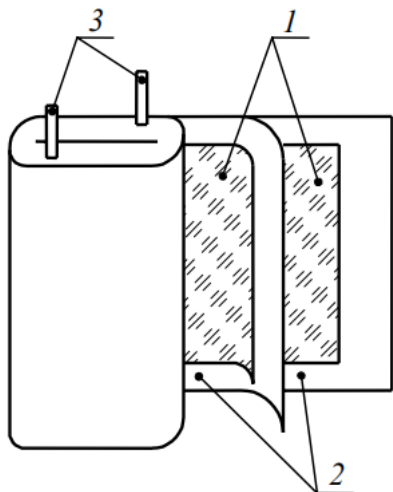


Рисунок 4. 7. - Влаштування секції високовольтного конденсатора: 1 – фольга; 2 – діелектрик (шари паперу, плівки); 3 – виводи

Ізоляція трансформаторів

У силових трансформаторах ізоляція складається з різних по конструкції елементів, що працюють у різних умовах.

Повітряні проміжки між вводами та їх поверхнею – **зовнішня ізоляція**.

Ізоляційні ділянки, розташовані всередині бака трансформатора та всередині вводів, – **внутрішня ізоляція**.

Внутрішня ізоляція поділяється на головну та поздовжню.

Головна ізоляція – між різними обмотками, стінками бака, магнітопроводом та ін. **Поздовжня ізоляція** – між елементами однієї і тієї ж обмотки: між витками, шарами, котушками. У високовольтних силових трансформаторах як головна використовується **маслобар'ерна ізоляція**.

Поздовжня ізоляція виконується паперово-олійною. Кількість бар'ерів залежить від номінальної напруги трансформатора.

На рис. 4. 8 наведено схематичне пристрій головної ізоляції високовольтного трансформатора. Високовольтні обмотки виконуються котушкового типу або безперервного циліндричного багат шарового намотування.

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

У високовольтних силових трансформаторах як головна використовується маслобар'ерна ізоляція. Поздовжня ізоляція виконується паперово-олійною. Кількість бар'ерів залежить від номінальної напруги трансформатора.

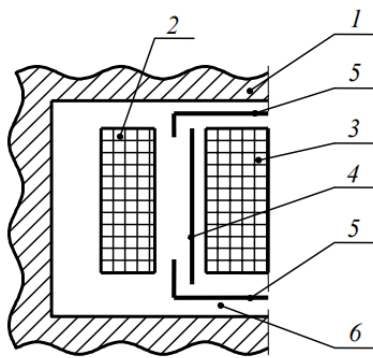


Рисунок 4. 8 - Схема влаштування ізоляції високовольтного трансформатора:

1 – магнітопровід; 2 - низьковольтна обмотка (НВ); 3 – високовольтна обмотка (ВО); 4 – бар'єр; 5 – шитки електроізоляції; 6 - масло

Ізоляція кабелів

Основне призначення кабелів – передача електричної енергії від підстанції споживачам.

Силові кабелі високої напруги виконуються трьох типів:

1) кабелі з паперовою ізоляцією та в'язким просоченням на напругу до 35 кВ (робоча напруженість ЕРАБ = 2...3 кВ/мм);

2) кабелі з паперовою ізоляцією з просоченням маслом під тиском – маслонаповнені кабелі:

2...3 атм – низький тиск (ЕРАБ = 3 ... 5 кВ / мм);

4...5 атм – середній тиск (ЄРАБ = 6...8 кВ/мм);

8 ... 15 атм - високий тиск (ЄРАБ = 10 ... 15 кВ / мм);

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

Крім цього, знайшли застосування кабелі в трубах під тиском масла чи газу. Розробляються криогенні кабелі з охолодженням до температури рідкого азоту (77 К) або рідкого гелію (5 К).

Кабелі виконуються на напругу до 500 кВ. Розробляються кабелі на напругу 750 кВ. На рис. 4.9 наведено схему пристрою трифазного кабелю з поясною ізоляцією. Такі кабелі випускаються на робочу напругу до 10 кВ.

На 35 кВ випускаються кабелі з окремо оцинкованими жилами та бронєю зі сталевих стрічок типу АОСБ (А – алюмінієва жила, О - окремо оцинковані жили, СБ – броня сталевими стрічками).

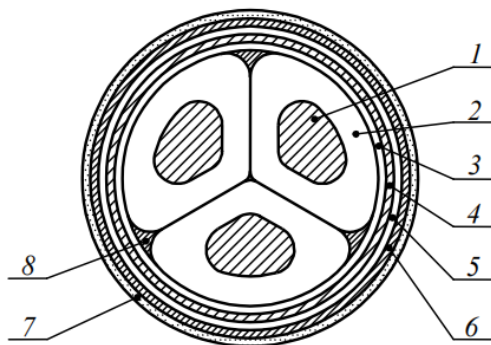


Рисунок 4. 9 - Схема влаштування ізоляції кабелів до 35 кВ:

1 – жила; 2 – фазна ізоляція; 3 – поясна ізоляція; 4 – герметичне покриття; 5 – подушка; 6 – броня; 7 – антикорозійне покриття; 8 – наповнювач (джут)

На рис. 4. 10 наведена схема пристрою маслонаповненого кабелю на робочу напругу 110 кВ. Як правило, виконуються однофазними у свинцевій оболонці з бронєю із круглих або плоских дротів. Наприклад, типу МССК-110, де М - маслонаповнений; С – середнього тиску; С – свинцевий екран; К – броня круглим сталевим дротом.

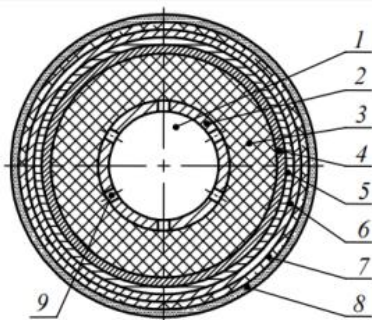


Рисунок 4. 10 - Схема влаштування ізоляції кабелю 110 кВ:

1 – масляний канал; 2 – перфорована струмоведуча жила; 3 – паперово-олійна ізоляція; 4 – напівпровідний шар; 5 – герметичне покриття; 6 – подушка

ка; 7 – броня; 8 – антикорозійне покриття; 9 – отвори для проходу олії в ізоляцію.

Ізоляція електричних машин

До машин, що обертаються, високої напруги відносяться турбо і гідро-генератори, синхронні компенсатори і двигуни великої потужності з номінальною напругою 3 кВ і вище. Вони виконують важливі функції в енергосистемах та промислових підприємствах. До їхньої ізоляції висуваються дуже високі вимоги.

Гідрогенератори розробляються та виготовляються на напругу до 220 кВ. Пристрій ізоляції машини високої напруги, що обертається, визначається конструкцією її статорної обмотки.

Ізоляція статорних обмоток підрозділяється на головну (корпусну) та поздовжню. Головна – ізоляція між провідниками обмотки та корпусом, а поздовжня – між витками однієї котушки та котушками в одному пазу.

Велике значення має регулювання електричного поля ізоляції статорної обмотки. Основне завдання регулювання електричних полів – усунення часткових розрядів у повітряних зазорах між поверхнею ізоляції та стінками пазів та усунення ковзних розрядів по поверхні ізоляції, у місцях виходу обмоток із паза статора, де поле виходить різко неоднорідним. Для цього використовуються напівпровідні покриття із залізистої азбестової стрічки та різні лаки. На рис. 4.11 наведено пристрій високовольтної ізоляції у пазу електричної машини.

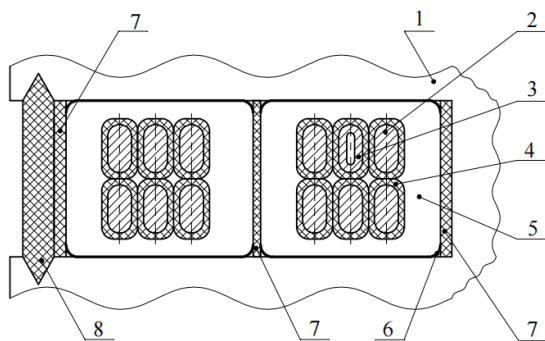


Рисунок 4.11 - Схема улаштування високовольтної ізоляції електричної машини: 1 – статор; 2 – провідник суцільний; 3 – провідник порожнистий; 4 – виткова (поздовжня) ізоляція; 5 – головна корпусна ізоляція; 6 – напівпровідне покриття; 7 – прокладки; 8 – клин.

Ізоляційні матеріали, які використовуються в електричних машинах, що виготовляють на основі слюди (міканіт, мікастрічки, мікафорій). Широко використовуються компаунди (термопластичні), як сполучні застосовують терморективні лаки та смоли.

Профілактика ізоляції

Завдання та цілі профілактики

Профілактика – система заходів, за допомогою яких забезпечується надійна робота ізоляції у процесі експлуатації. Профілактика проводиться з метою виявлення дефектів, що виникають в ізоляції під час експлуатації. Ослаблення електроізоляційних властивостей відбувається за рахунок:

а) загального старіння; б) поява місцевих дефектів.

Загальне старіння охоплює величезний обсяг ізоляції. Місцеві дефекти з'являються у вигляді зосереджених тріщин, повітряних включень, часткових зволожень. У більшості випадків ці дефекти не можуть бути виявлені в результаті простого огляду ізоляції, тому для їх виявлення потрібна певна система профілактичних випробувань. Профілактичні випробування ізоляції різко знижують аварії в енергетичних системах через своєчасне виявлення дефектної ізоляції. До кожного виду ізоляції характерні певні види дефектів. Вивчення їх фізичних особливостей та причин появи також входить до завдань профілактики ізоляції. Це дозволяє більш правильно організувати експлуатацію обладнання та розробляти найефективніші методи профілактичних випробувань.

Таким чином, до завдань профілактики ізоляції входить:

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

Запитання для самоконтролю

1. Яка основна особливість зовнішньої (повітряної) ізоляції
2. Яка ізоляція відноситься до зовнішньої ізоляції?
3. Яка ізоляція відноситься до внутрішньої ізоляції?
4. Від чого залежать максимальні значення та тривалість перенапруг?
5. Чим обумовлені комутаційні перенапруги?
6. Форми електричних полів.
7. Що залежить від форми електричного поля?
8. Дати визначення, що таке однорідне поле, слабо неоднорідне та різко неоднорідне поле?
9. Які існують системи електродів?
10. Назвати причини старіння ізоляції, розподіл ізоляторів за призначенням
11. Відмінності прохідних і опорних ізоляторів
12. Ізоляція вводів та види ізоляції кабелів

ЛЕКЦІЯ № 5. ЗОВНІШНЯ ІЗОЛЯЦІЯ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ І РОЗПОДІЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

1. Призначення, типи та характеристики ізоляторів.
2. Конструкції та характеристики станційних та лінійних ізоляторів
3. Гірлянди ізоляторів. Розподіл напруги за елементами гірлянди.
4. Вибір ізоляторів
5. Вибір основних ізоляційних проміжків ЛЕП та РП.

ЛІТЕРАТУРА

1. Правила улаштування електроустановок. - Видання офіційне. Міненерговугілля України. - Х. : Видавництво «Форт», 2017. - 760 с. 6.
2. Акімов О. І., Сушко Д. Л. Техніка високих напруг. Ізоляція та перенапруги в пристроях електропостачання і електричної тяги залізничного транспорту: Навч. посібник. – Харків: УкрДАЗТ, 2009. – 217 с.
3. Василець С. В., Василець К. С. Техніка високих напруг: навчальний посібник [Електронне видання]. – Рівне : НУВГП, 2018. – 187 с.
4. Красько, А.С. Техніка високих напруг (ізоляція і перенапруги): курс лекцій: в 2 ч. / А.С. Красько, Е.Г. Пономаренко. – Минск: БНТУ, 2011. – Ч. 1: Электрические разряды в газах. Внешняя изоляция воздушных линий и распределительных устройств. Внутренняя изоляция. – 119 с.
5. Козирський В. В. Електропостачання агропромислового комплексу / В. В. Козирський, В. В. Каплун, С. М. Волошин – К.: Аграрна освіта, 2011- 448 с.

Призначення, типи та характеристики ізоляторів

Ізолятори призначені для кріплення струмопроводів, а також для створення ізоляційних проміжків між струмопроводами різних фаз і між струмопроводами та заземленими конструкціями.

За призначенням ізолятори поділяються на *станційні, лінійні та апаратні*.

Станційні ізолятори призначені для закріплення струмопроводів у закритих розподільних пристроях, а також для пропуску їх через стіни та перекриття. Вони відповідно поділяються на *опорні та прохідні*.

Лінійні ізолятори призначені для закріплення проводів на ПЛ та ВРП (відкритих розподільчих пристроях).

Лінійні поділяються на *штирєві, стрижневі та підвісні*.

Ізолятори високовольтної апаратури, опорні та прохідні, є невід'ємною частиною апаратури та за конструктивним виконанням можуть бути різної форми.

Діелектричні матеріали, з яких виготовляються ізолятори, повинні мати високу електричну та механічну міцність. Ці характеристики повинні забезпечуватися як у нормальних умовах експлуатації, так і в аварійних режимах, за різних атмосферних умов, бути негігроскопічними, трекінгостійкими, працювати в широкому діапазоні температур та в агресивному середовищі.

Всім цим вимогам задовольняють такі матеріали: глазурована електротехнічна порцеляна, скло та деякі пластмаси.

Порцеляна має такі характеристики:

електрична міцність $E = 20-25$ кВ/см;

механічна міцність порцеляни залежить від характеру деформації:

$\sigma_{зтиск} = 400-700$ МПа, з МПа 15080 □ □ □ ,

р МПа 7045 □ □ ; допустимий перепад робочих температур 70 °С.

Одна з переваг порцеляни як ізоляції – низька вартість.

Скло має електричну міцність $E = 45$ кВ/см. Механічні характеристики скла приблизно такі ж, як у порцеляни.

Загартоване скло допускає навантаження до 530 кН. Скляні ізолятори можуть виготовлятися методом штампування та не вимагають глазурування. Прозорість скла дозволяє легко виявляти тріщини та інші дефекти, що полегшує контроль під час виробництва та експлуатації.

Загальний недолік порцелянових та скляних ізоляторів – значна маса та розміри.

В даний час широкого поширення набули ізолятори на основі склопластиків та полімерних покриттів. Полімерні ізолятори практично не пошкоджуються під час транспортування і мають значно меншу (в 7–10 разів) металоемність підвісок, меншу масу та розміри.

Металеву арматуру ізоляторів виготовляють із сталі, ковкого та немагнітного чавунів або кольорового металу. Немагнітний чавун та кольоровий метал застосовуються при великих струмах з метою зниження втрат.

Для кріплення арматури до діелектрика використовують високоякісні цементи та інші сполучні.

Для виготовлення ізоляторів високовольтної апаратури використовується також епоксидна смола, бакелізований папір та шаруваті пластики.

У високовольтних вводах застосовують паперово-масляну та маслобар'єрну ізоляцію, захищену порцеляновими покриттями.

Під впливом струмів короткого замикання, вітру, ожеледиці та ваги проводів високовольтна ізоляція відчуває великі механічні навантаження та вібрації. Крім того, ізоляція ПЛ і ВРП схильна до впливу туману, дощу, забруднення та різких коливань температури.

Тому ізоляційні матеріали повинні забезпечувати тривалу електричну міцність з урахуванням кліматичних умов та рівня перенапруги, а також достатню механічну міцність.

Для забезпечення надійної та безпечної роботи ізоляція піддається випробуванню підвищеною напругою. Значення випробувальних напруги для ізоляції різних класів напруги наводяться в таблицях.

Для ізоляторів внутрішньої установки визначальним є сухорозрядна напруга $U_{с.р.}$, а для ізоляторів зовнішньої установки – мокророзрядна $U_{м.р.}$ – напруга покриття під дощем.

Ізолятори для закритих установок.

Опорні та прохідні ізолятори ЗРП виготовляються з електротехнічної порцеляни.

Їх виготовляють в нормальному (рис. 5.1, а) і малогабаритному виконанні (рис. 5.1, б, в).

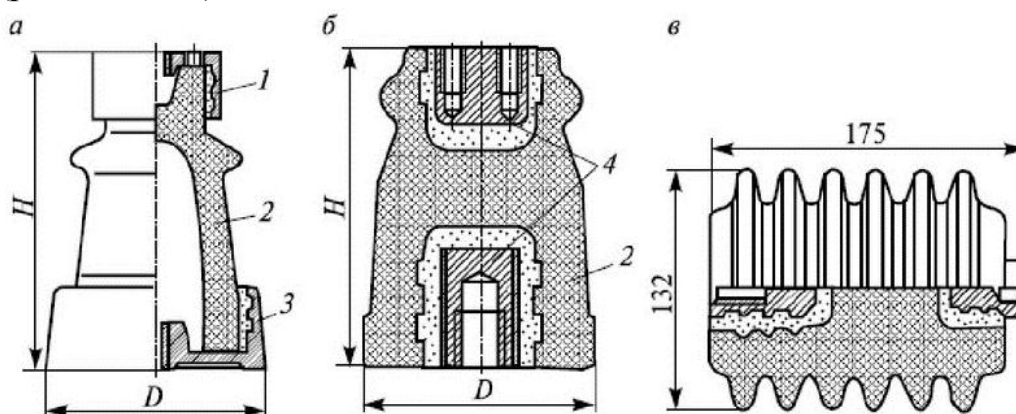


Рисунок 5. 1 - Опорні ізолятори в нормальному (рис. 5.1, а) і малогабаритному виконанні; б і в - малогабаритні.

Ізолятори нормального виконання(рис. 5.1) знизу і зверху армовані фланцями 3 і ковпаками 1, які необхідні для кріплення ізолятора на конструкції і струмоведучих частин на ізоляторі. Порцеляновий корпус 2 ізолятора кріпиться в чугунному ковпаку за допомогою цементної замазки. Ізолятор з круглим фланцем кріпиться до металевих конструкцій одним болтом, з овальним фланцем - двома болтами, з квадратним фланцем - чотирма. Якщо в маркуванні відсутнє позначення типу фланця, значить він втоплений (рис. 5. 1 б). В комплектних РП застосовуються малогабаритні опорні ізолятори з ребристою поверхнею (рис.5.1 в).

Механічна міцність ізолятора визначається силою, прикладеною до головки ізолятора, або згинальним моментом. Ці величини залежать від діаметра D та висоти виробу H .

Основними електричними характеристиками ізоляторів є: **сухорозрядна напруга** перекриття по поверхні $U_{c,p}$ та **напруга пробою діелектрика** U_{np} .

При пробі ізолятор втрачає свої ізоляційні властивості і стає непридатним для подальшого використання. При перекритті ізолятора по поверхні ізоляційні властивості відновлюються після відключення напруги. Тому напруги пробою має бути значно більшою за напругу перекриття $U_{np} > U_{c,p}$. Електричне поле опорного ізолятора є неоднорідним, має значну тангенційну складову E_{\square} . Крім того, на розподіл напруги по висоті ізолятора сильно впливає зволоження та змочування поверхні. Тому розрядна напруга вздовж поверхні в 1,5-2 рази нижче за розрядну напругу в повітрі.

Для вирівнювання електричного поля в області високої напруги верхня частина ізолятора має невелике ребро. На напрузі 20–35 кВ ізолятори можуть мати кілька ребер.

Основними каталожними параметрами опорних ізоляторів для закритих установок є: номінальна напруга U_n , сухорозрядна напруга по поверхні при частоті 50 Гц $U_{c,p}$, імпульсна напруга перекриття U_i , згинальний момент $M_{згин}$, найбільший діаметр діелектрика D , висота ізолятора H і довжина шляху витоку по поверхні L .

Прохідні ізолятори для закритих установок (рис. 5.2) виконуються циліндричної форми з невеликими ребрами біля торців.

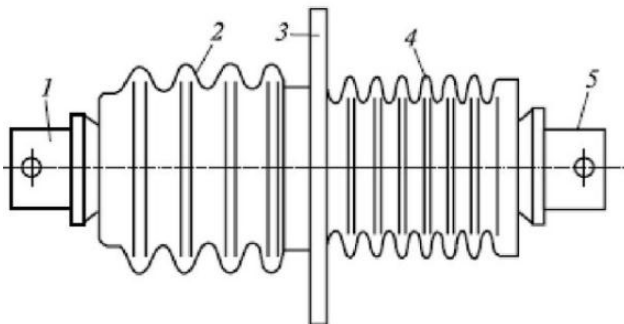


Рисунок 5. 2 - Прохідний ізолятор:

1 та 5 - контактні виводи; 2 - зовнішня порцелянова втулка ; 3 - фланець; 4 - внутрішня порцелянова втулка.

Ізолятор складається із порожніх порцелянових втулок 2 і 4 всередині яких проходить стіпопровідний стрижень з контактними виводами 1 і 5, що мають отвори для приєднання до них. Фланець 3 призначений для кріплення ізолятора до прохідної плити в прорізі стіни. Порцелянова втулка 4 призначена для роботи зовні і має більш ребристу поверхню, ніж втулка 2, яка пра-

цює всередині приміщення. Діаметр ізоляційного циліндра під фланцем вибирається виходячи з допустимої механічної міцності, тому що при протіканні струмів короткого замикання в цьому перерізі виникають найбільш небезпечні механічні напруги.

Електричне поле прохідного ізолятора дуже неоднорідне і має значну нормальну складову E_n в області перетину під фланцем.

Тому, за наявності повітряного прошарку між струмопровідним стрижнем та діелектриком **можливе виникнення корони**.

При напругах 20 кВ і вище для запобігання корони внутрішня поверхня ізолятора металізується і їй повідомляється потенціал стрижня та прагнуть ліквідувати повітряний прошарок, заповнюючи внутрішню порожнину між стрижнем і порцеляною твердим або рідким діелектриком.

Різко неоднорідні поля з великим значенням нормальної складової напруженості електричного поля спостерігаються в прохідних ізоляторах, ізоляції обмоток електричних машин при виході з паза та інших конструкціях.

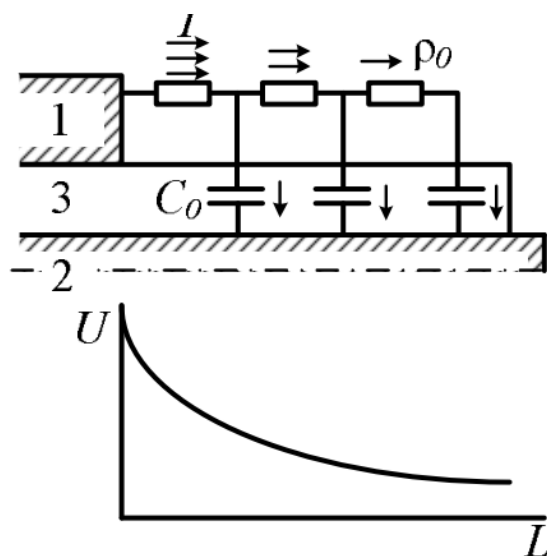


Рисунок 5. 3 - Схема заміщення і розподілення напруги по поверхні прохідного ізолятора.

Еквівалентна схема заміщення прохідного ізолятора (рис. 5.3) складається з ρ_0 – питомого поверхневого опору та C_0 – ємності одиниці поверхні ізолятора щодо електрода. Струми, що протікають через опір ρ_0 та ємність C_0 , неоднакові. В результаті має місце нерівномірний розподіл напруги поверхнею ізолятора. Найбільше значення напруги матиме місце біля фланця 1.

Нерівномірність буде тим більшою, чим більше ϵ діелектрика та менше товщина стінок.

В результаті поверхневий розряд розвивається від електрода 1 до електрода 2, проходячи послідовно стадії коронного розряду, ковзного розряду та

перекриття (пробою). При перекритті ізолятора внаслідок термічного впливу в деяких видах діелектриків можлива поява провідних каналів (треків).

Розвиток розряду полегшується при імпульсних напругах і підвищених частот. Для збільшення напруги перекриття застосовують ребристі поверхні та матеріали з малим значенням ϵ . В останньому випадку зменшується C_0 .

Напруги перекриття по поверхні наближено можна визначити за виразом:

$$U_{\text{пер}} = \frac{1}{K} \sqrt[5]{\frac{l_{i3}}{C_0^2}} \quad (5.1)$$

де K - коефіцієнт, що залежить від роду напруги;

l_{i3} - довжина ізолюючої поверхні.

Напруга виникнення ковзного розряду може бути збільшено за рахунок зниження напруженості поля у фланця шляхом металізації середньої частини зовнішньої поверхні У каталогах для прохідних ізоляторів вказуються такі ж параметри, що і для опорних, але додатково вказується номінальний струм, якщо ізолятор має вбудований струмопровідний стрижень.

Прохідні ізолятори для зовнішньої установки в більшості випадків є високовольтним вводом різної апаратури.

Ізолятори для відкритих установок.

Для відкритих установок застосовуються *штирьові, опорні та підвісні* ізолятори. Вони використовуються не тільки для кріплення струмопровідних частин ВРП та ПЛ, але також як невід'ємні елементи високовольтних апаратів, наприклад, роз'єднувачів. Ізолятори зовнішньої установки мають дуже розвинену поверхню (спідниці), що дозволяє зберегти сухі ділянки поверхні при дощі і тим самим збільшити розрядну напругу.

Штирьові ізолятори застосовуються для кріплення проводів ліній до 35 кВ. Вони виготовляються з порцеляни, скла або полімерів. Останні широко застосовуються на напрузі 0,4 кВ.

Типові конструкції опорних штирьових ізоляторів наведені на рис. 5.4. Ізолятор наворачтається на металевий штир, за допомогою якого кріпиться на опорі або траверсі опори. Для щільного кріплення штир обмотується синтетичною стрічкою або забезпечується спеціальною втулкою. Кріплення проводів здійснюється у верхній канавці до шийки ізолятора за допомогою дрітної в'язки. Опорні ізолятори в свою чергу поділяються на опорно-штирьові та опорно-стрижневі.

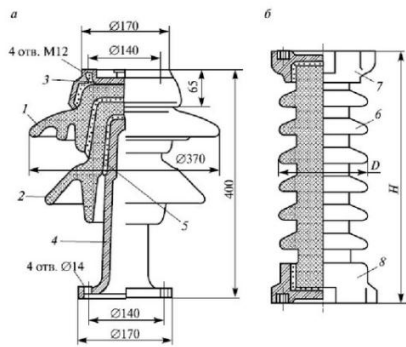
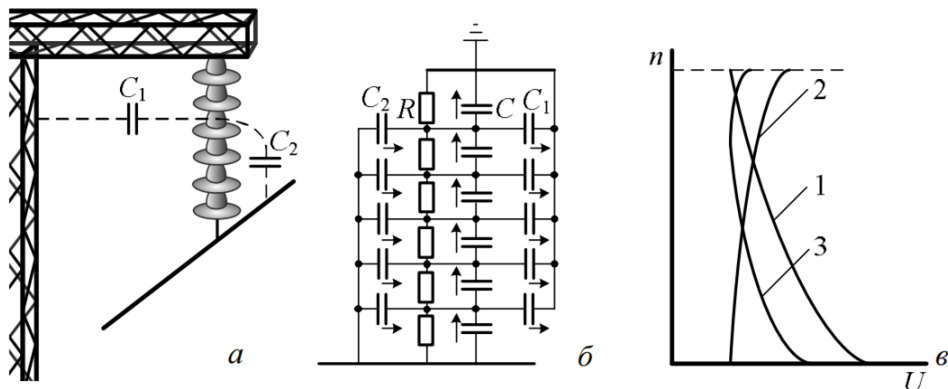


Рисунок 5.4 - Опорні ізолятори для зовнішніх установок:
 а - опорно-штирьові; б - опорно-стрижневі.

Вони застосовуються для кріплення жорсткої ошиновки ВРП, коли необхідно забезпечити високу механічну міцність, а також елементи роз'єднувачів і вимикачів.

Гірлянди ізоляторів. Розподіл напруги за елементами гірлянди

На напругу 35 кВ та вище підвісні ізолятори збираються у гірлянди (рис.5.5, а). Шарнірне з'єднання елементів гірлянди забезпечує гнучкість гірлянди, що знижує механічні навантаження на ізолятори при обриві проводу та сильному вітрі, а також створює зручність монтажу.



Запитання для самоконтролю

1. Розподіл ізоляторів за призначенням
2. Які ізолятори відносяться до станційних?
3. Які ізолятори відносяться до лінійних?
4. Вимоги до властивостей діелектричних матеріалів
5. Матеріали з яких виготовляють ізолятори

ЛЕКЦІЯ № 6. ВИСОКОВОЛЬТНЕ ВИПРОБУВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ТА ВИМІРЮВАННЯ.

6. 1. Розподіл ізоляторів за призначенням

7. Які ізолятори відносяться до станційних?
8. Які ізолятори відносяться до лінійних?
9. Вимоги до властивостей діелектричних матеріалів
10. Матеріали з яких виготовляють ізолятори

Кульові розрядники

ЛІТЕРАТУРА

1. Правила улаштування електроустановок. - Видання офіційне. Міненерговугілля України. - Х. : Видавництво «Форт», 2017. - 760 с. 6.
2. Важов В. Ф. Техніка високих напруг: курс лекцій / В. Ф. Важов, В. А. Лавринович. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 150 с.
3. Василюк С. В., Василюк К. С. Техніка високих напруг: навчальний посібник [Електронне видання]. – Рівне : НУВГП, 2018. – 187 с.
4. Козирський В. В. Електропостачання агропромислового комплексу / В. В. Козирський, В. В. Каплун, С. М. Волошин – К.: Аграрна освіта, 2011- 448 с.
5. Притака І. П. Електропостачання сільського господарства / І. П. Притака, Б. В. Мозирський. – Київ: Урожай, 1995 р. - 333 с.

Установки для отримання високих змінних напруг

Для отримання високих змінних напруг застосовуються однофазні високовольтні випробувальні трансформатори на напругу до $U_n = 1200$ кВ.

На велику напругу використовують каскадне з'єднання трансформаторів ($U_n = 2200$ кВ та більше).

Особливістю випробувальних трансформаторів є:

- 1) короткочасність роботи;
- 2) відсутність атмосферних перенапруг;
- 3) наявність кидків струму та різких спадів напруги при пробоях та перекриття випробуваних об'єктів.

Як правило, між обмотками низького (2) і високого (3) напруг (рис. 6.1) розташований мідний екран, що розрізає 4, з'єднаний із баком трансформатора. Екран призначений для захисту обмотки низької напруги від наведення високих потенціалів при різких змінах напруги з боку високовольтної обмотки.

На напругу понад 1000 кВ застосовується каскадне включення трансформаторів. Каскади трансформаторів зазвичай складаються з 2-3 ви-

соковольтних випробувальних трансформаторів, з'єднаних послідовно(див. рис. 6.2).

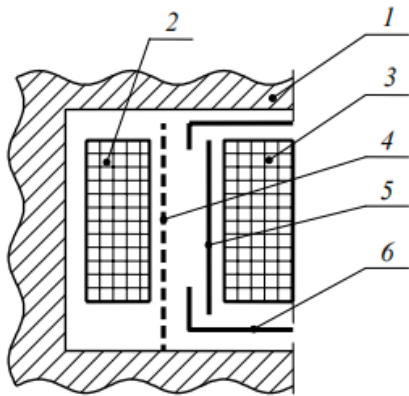


Рисунок 6.1. - Конструкція однофазного трансформатора:

1 – магнітопровід; 2 – обмотка низької напруги; 3 – обмотка високої напруги; 4 – екран мідний; 5 – бар'єр електроізоляційний; 6 – шайби електроізоляційні.

Оскільки один вивід обмотки трансформатора з'єднаний з корпусом, то корпус кожного наступного трансформатора знаходиться під високою напругою попереднього трансформатора.

Отже, всі наступні трансформатори, крім першого, повинні бути ізольовані від землі та один від одного.

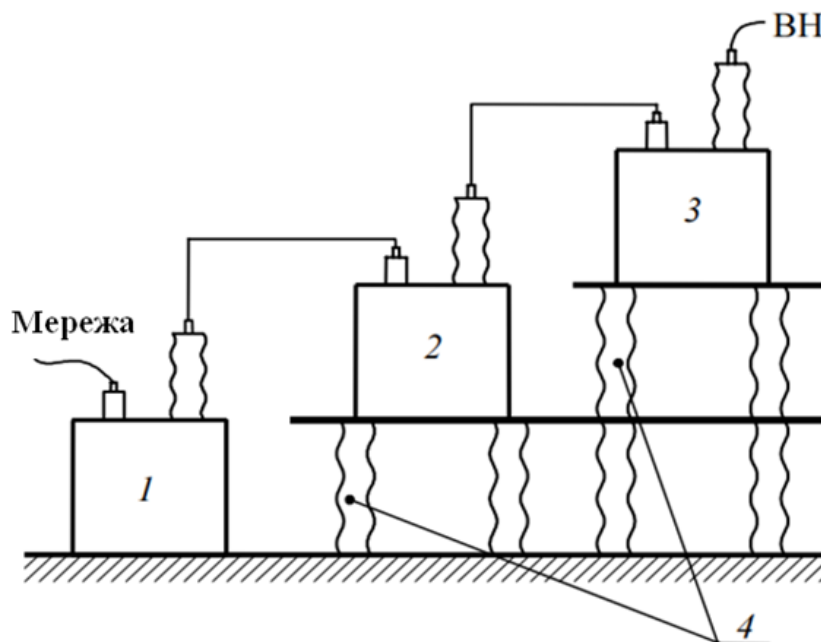


Рисунок 6.2. - Спрощена схема з'єднання каскаду трансформаторів: 1–3 – високовольтні трансформатори; 4 – опорні ізолятори.

Напруга на виході каскаду, що складається з n послідовно включених трансформаторів:

$$U_{BH} = n \cdot U_2.$$

де U_2 - напруга на виході першого трансформатора.

Установки для отримання високої постійної напруги

Постійну напругу часто використовують для випробувань конденсаторів, кабелів, машин, що обертаються.

Для отримання високої напруги постійного струму використовуються різні випрямні установки.

Усі схеми випрямлення класифікуються за такими ознаками:

- 1) за формою випрямленої напруги – одно- та двонапівперіодні схеми;
- 2) за схемою з'єднання випрямлячів - мостова схема, послідовно-паралельні схеми;
- 3) за кількістю фаз – одно-, дво- та трифазні схеми;
- 4) схеми множення напруги.

Однонапівперіодна схема випрямлення наведена на рис. 6.3. Випрямлення напруги без фільтра за схемою рис. 6.3 а дає велику глибину пульсацій випрямленої напруги (див. рис. 6.3, в).

Наявність фільтра (див. рис. 3.3 б) зменшує глибину пульсацій (див. рис. 6.3 г) за рахунок підживлення від конденсатора C_Φ протягом часу негативного напівперіоду, коли випрямляч V закритий.

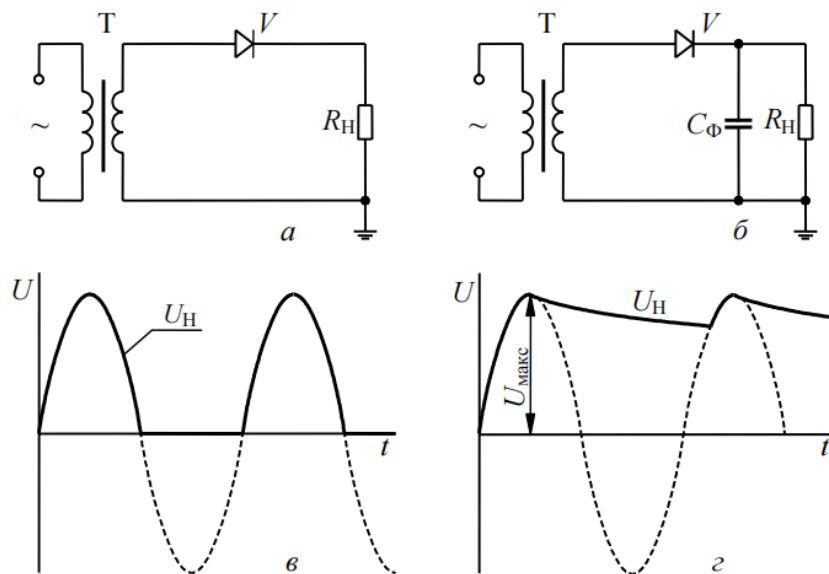


Рисунок 6.3. - Схема випрямлення однонапівперіодна:

а, в – без фільтра; б, г – з фільтром;

T – високовольтний трансформатор; V – випрямляч; R_H – опір навантаження; C_Φ - ємність фільтра.

Двонапівперіодна мостова схема випрямлення наведена на рис. 6.4.

Чотири випрямлячі утворюють міст, одну діагональ якого включається навантаження R_H , а до іншої діагоналі підключається трансформатор. При "+" напівперіод відкриті випрямлячі V_1 і V_3 , а при "-" напівперіод - V_2 і V_4 .

Отже, через навантаження протікає струм одному напрямку протягом усього періоду змінного струму (див. рис. 6.4, а в).

Це основна перевага двонапівперіодної схеми випрямлення.

Фільтр C_{ϕ} зменшує глибину пульсацій випрямленої напруги (див. рис. 6.4, б, г).

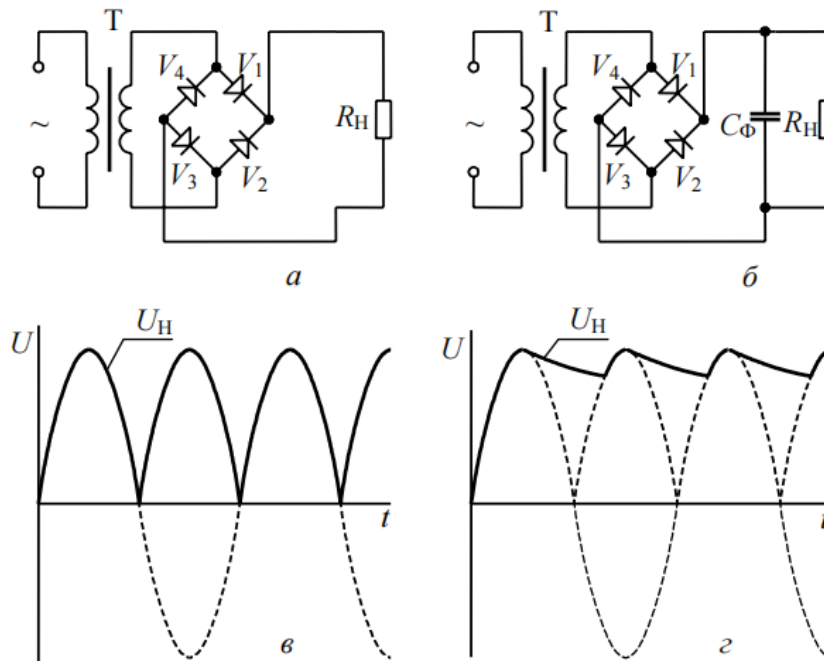


Рисунок 6.4. - Мостова схема випрямлення:
а, в – без фільтра; б, г – з фільтром

Включення однофазних схем випрямлення призводить до перекосу фаз трифазної мережі. Для виключення цього явища використовують трифазні схеми випрямлення (рис. 3.5 а).

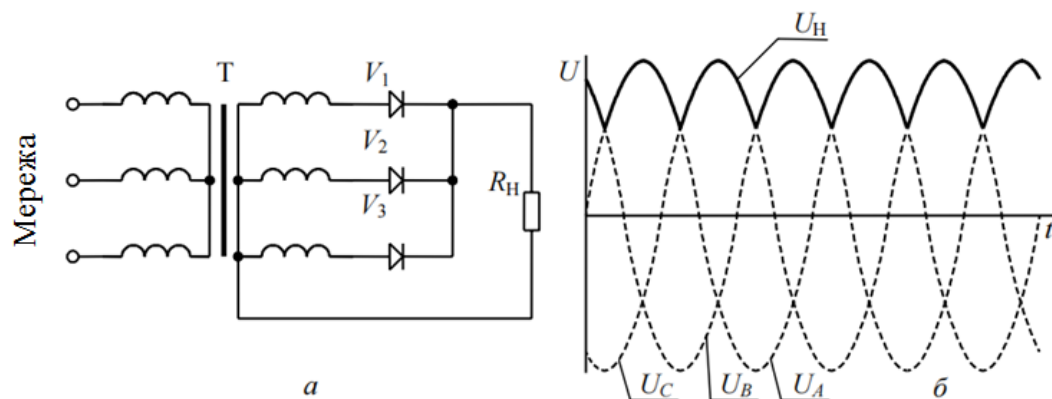


Рисунок 6.5. - Трифазна однонапівперіодна схема випрямлення

Крім цього, зменшуються пульсації випрямленої напруги (рис. 6.5 б), особливо із застосуванням фільтра C_{ϕ} .

Високу випрямлену напругу зручно отримувати за допомогою схем множення випрямленої напруги.

Розрізняють:

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

Найпростіша однонапівперіодна схема подвоєння напруги наведена на рис. 6.6 а.

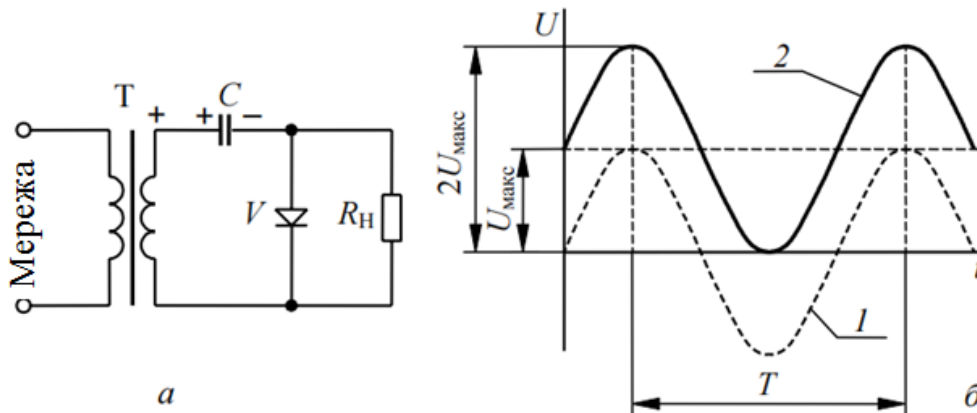


Рисунок 6.6. - Однонапівперіодна схема подвоєння (а) та осцилограма напруги на навантаженні (б):

- 1 – фазна змінна напруга;
- 2 – подвоєна випрямлена напруга

В один напівперіод (позитивний) випрямляч пропускає струм.

Ємність C заряджається до U_m : обкладки мають полярність "+" та "-".

У другому напівперіоді, коли змінилася полярність кінців обмотки трансформатора, напруга трансформатора "+" підсумовується з напругою на конденсаторі "-". На навантаженні виходить пульсуюча випрямлена напруга, що змінюється від нуля до $2U_m$ (рис. 6.6 б).

Випрямляч виявляється також під подвійною напругою:

$$U_{обр} = 2U_m.$$

Каскадний генератор постійного струму

Отримання високих напруг постійного струму в сотні і тисячі кіловольт можливе за допомогою схем випрямлення та множення випрямлених високих напруг (каскадний генератор). Схема каскадного генератора постійного струму складається із схем подвоєння напруги, з'єднаних у багаторазовій послідовності.

Напруга на виході каскадного генератора дорівнює:

$$U_{вих} = 2 \cdot n \cdot U_m,$$

де n - Число ступенів (схем подвоєння) в каскаді;

U_m – амплітудне значення живильного трансформатора.

Імпульсні випробувальні установки

Для випробування ізоляції високовольтного електрообладнання грозовими та комутаційними імпульсами використовуються **генератори імпульсної напруги (ГІН)**.

Грозові дії відтворюються стандартними імпульсами напруги: повною та зрізаною хвилями.

Стандартні імпульси (1,2/50 або 2,0) можна отримати на установці, схема якої наведена на рис. 6.7.

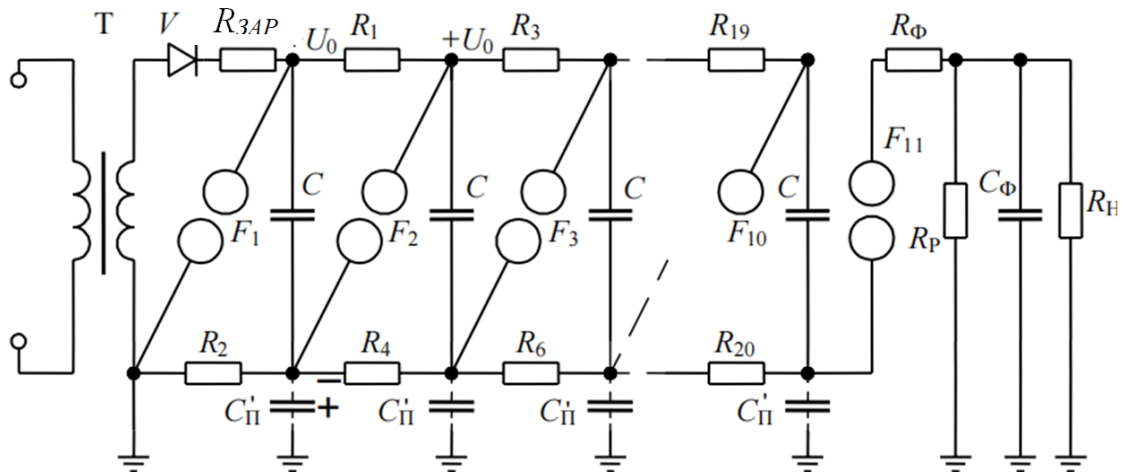


Рисунок 6.7. - Принципова електрична схема ГІН із односторонньою зарядкою:

T – високовольтний трансформатор; V – випрямляч; R_{3AP} – опір обмеження зарядного струму; R_1-R_{20} - зарядні опори; F_1-F_{11} - іскрові проміжки; C – ємності ступені ГІН; C_{II} - "паразитні" ємності; R_{Φ} , U_{Φ} – фронтові опір та ємність; R_P - розрядний опір; R_H – опір навантаження

Зарядка ємностей виробляється паралельно, а розряджаються вони послідовно, що призводить до складання зарядної напруги ступенів.

Для забезпечення практично однакової зарядки всіх конденсаторів до U_0 необхідно дотримуватися умов: $R_1-R_{20} \ll R_{3AP}$.

При напрузі U_0 пробивається лише F_1 . Ємність розряджається в контурі $C - R_2 - F_1$, але R_2 великий (десятки кілоом). У перший момент розрядка йде по $C - C_{II}' - F_1$ ($X_C = 1/\omega C$, ω – кругова частота порядку мегагерц, отже, X_C – малий). C_{II}' швидко заряджається до U_0 .

Тоді до F_2 прикладено подвоєну зарядну напругу U_0 , тому F_2 може мати відстань у 2 рази більше, ніж F_1 і т. д.

Для регулювання параметрів імпульсу напруги та отримання стандартної хвилі використовуються елементи:

R_{Φ} – фронтовий опір, C_{Φ} – фронтна ємність, R_P – розрядний опір.

Довжину фронту формують C_ϕ та R_ϕ , довжину імпульсу – R_Σ , тобто R_P спільно з R_H :

$$t_\phi = 3,24 \cdot R_\phi \cdot C_\phi;$$

$$t_e = 0,7 \cdot C_{ГН} \cdot R_\Sigma.$$

Зміна амплітуди імпульсу регулюється зміною відстані між кульовими електродами F_1, F_2, \dots, F_{10} .

Проміжок F_{11} служить відділення зарядної ємності ГН від навантаження при зарядженні конденсаторів постійною напругою, щоб виключити вплив постійної зарядної напруги на навантаження.

ГН використовується для випробування високовольтного ізоляції обладнання. Внутрішня ізоляція випробовується прикладенням трьох повних імпульсів і трьох зрізаних імпульсів позитивної та негативної полярності.

Генератор імпульсних струмів.

Генератори імпульсів струму (ГІС) використовуються для імітації впливу імпульсів струму великої амплітуди. Електрична схема ГІС наведено на рис. 6. 8.

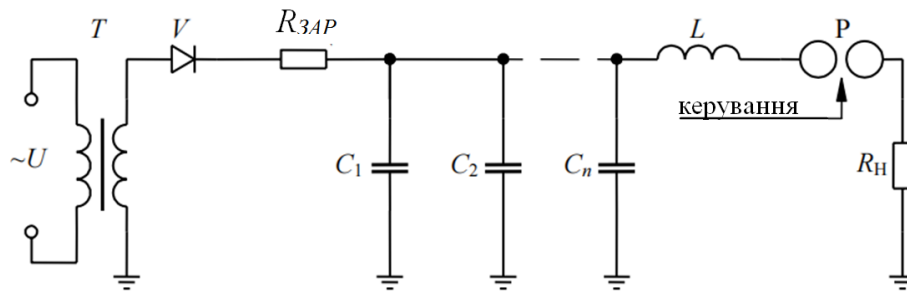


Рисунок 6.8. - Електрична схема ГІС:

V – високовольтний випрямляч; $R_{ЗАР}$ – опір 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 в канал розряду після пробою. Величина струму визначається в першу чергу індуктивністю та ємністю розрядного контуру:

$$I_m = \frac{U_0}{\sqrt{\frac{L}{C}}},$$

де U_0 – зарядна напруга; L – індуктивність контуру;

$C = n \cdot C_1$ (якщо $C_1 = C_2 = \dots = C_n$) – ємність розрядного контуру.

Вимірювання високих напруг

Кульові розрядники

Для вимірювань високої напруги широко використовуються кульові розрядники. Це універсальний вимірювальний пристрій, яким можна вимірювати амплітудні значення постійної, змінної, високочастотної та імпульсної напруги. Величина пробивної напруги залежить від відстані між кулями, їх діаметра, способу підключення (симетричне підключення або одна куля заземлена), відносної щільності повітря δ .

Для отримання високої точності необхідно виконати низку умов.

1. Відстань між кулями має перевищувати

$$S \leq 0,5D,$$

де D – діаметр куль.

Отже, для широкого діапазону вимірювальних напруг потрібен набір куль різного діаметра.

2. Поверхня куль має бути гладенькою та чистою. Шар пилу знижує пробивну напругу.

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

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

5. Вимірювання слід проводити 4-5 разів і за виміряну величину приймати середнє арифметичне значення, тому що має місце статистичний розкид пробивних напруг.

Вимірювання постійної та змінної напруги проводиться наступним чином.

Спочатку встановлюється свідомо велика відстань між кулями, що включає пробій при вимірюваній напрузі. Потім на кульовий розрядник подається напруга і відстань між кулями плавно зменшується до виникнення пробою проміжку. Ця процедура повторюється 4-5 разів. Визначається середня пробивна відстань, потім за таблицями знаходиться відповідна напруга.

При вимірі амплітуди імпульсної напруги за пробивну відстань між кулями приймають таку, у якій половина поданих імпульсів, прикладених до розрядника, викликає пробій проміжку, а половина – ні.

Цю напругу називають 50% пробивною напругою. Величину пробивної напруги визначають з таблиць отриманої пробивної відстані.

При вимірі користуються градуювальними таблицями, що дають зв'язок пробивної напруги з діаметром кульових електродів і відстанню між ними. У таблицях наведено амплітудні значення пробивної напруги. Таблиці Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК) складено для нормальних атмосферних умов ($P = 760$ мм рт. ст. і $T = 20^{\circ}$ C).

Значення пробивної напруги в залежності від відстані між кульовими електродами для різних діаметрів куль наведені в Додаток 3, табл. ПЗ.1 та ПЗ.2.

Електростатичні вольтметри

Розглянемо електростатичні вольтметри, що найбільш широко застосовуються. Електростатичні вольтметри вимірюють значення напруги, що діє.

Принцип дії ґрунтується на механічному переміщенні одного з електродів вольтметра під впливом електростатичних сил.

Вимірювання проводиться за рахунок врівноважування цієї механічної сили вантажем або пружиною:

$$F = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S}{l^2 \cdot 2} U^2 = K \cdot U^2,$$

де S – площа рухомого електрода;

l – відстань між електродами;

Пристрій електростатичного вольтметра А. А. Чернишова приведено на рис. 6. 9.

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

У технічних електростатичних кіловольтметрах, наприклад, С100 на напругу до 75 кВ, врівноважування рухомого електрода здійснюється пружиною розтяжкою, де укріплено дзеркальце.

Відлік показів здійснюється за рахунок світлового променя.

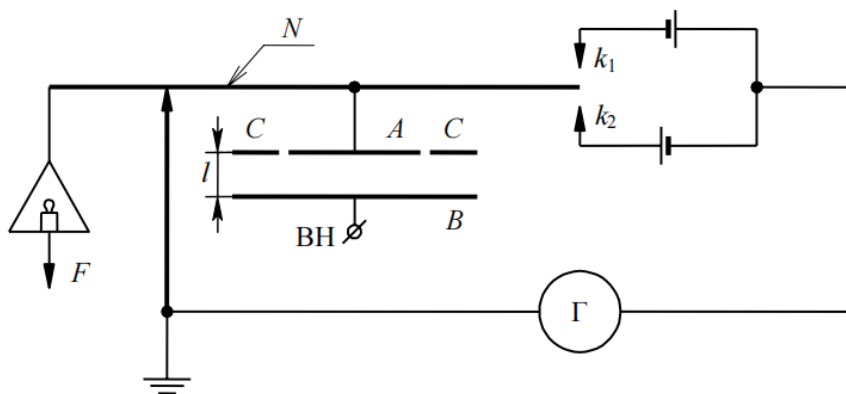


Рисунок 6. 9. - Пристрій електростатичного вольтметра А. А. Чернишова:

A – рухливий заземлений диск, B – нерухомий високовольтний диск, C – охоронне заземлене кільце, N – металеве заземлене коромисло, $k1, k2$ – контакти ланцюга гальванометра, Γ – гальванометр

Дільники напруги

Дільники напруги (ДН) дозволяють не тільки вимірювати напругу, але й зафіксувати форму сигналу, що впливає за допомогою електронного осцилографа (див. рис 6.10).

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

Дільник характеризується коефіцієнтом поділу K_d - відношення величини повного опору дільника до величини опору низьковольтного плеча з урахуванням кабелю, що передає Z_k і вимірювального пристрою.

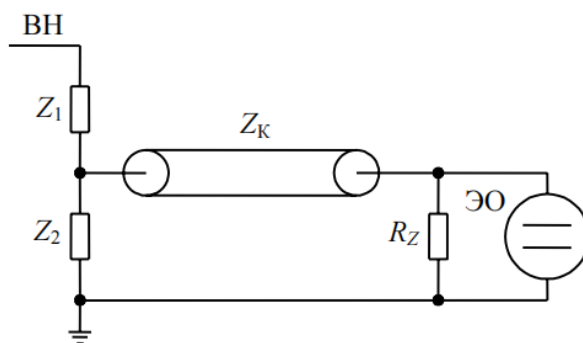


Рисунок 6.10. - Схема вимірювання високої напруги за допомогою дільника напруги.

Вимоги до дільників напруги:

1. Коефіцієнт поділу не повинен залежати від амплітуди, полярності, тривалості вимірюваної напруги.
2. Коефіцієнт поділу не повинен залежати від зовнішніх електричних полів.

3. Дільник має бути зручним в експлуатації та відносно дешевим.
 У кожного типу дільника є свої переваги та недоліки.
 Найбільш універсальним є третій тип дільника - ємнісно-омічний;
 правда, він і найскладніший.

Як опір високовольтного плеча R_1 використовують рідинні або дротяні малоіндуктивні резистори. Рідинні резистори виготовляють, наприклад, з розчину CuSO_4 в дистильованій воді.

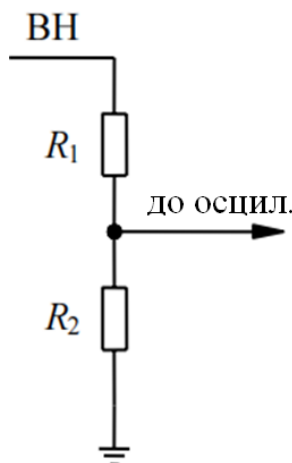


Рисунок 6.11. - Схема заміщення омічного дільника.

Недоліки рідинних омічних дільників:

K_d залежить від температури, від забруднення сторонніми іонами. Дротяні резистори виготовляють із високоомного дроту – ніхрому, константану. Застосовується малоіндуктивне біфілярне намотування з малим кроком. Індуктивність дротяних резисторів більша, ніж рідинних. Це призводить до спотворення форми імпульсів за коротких часів дії.

Ємнісний дільник

Схема ємнісного дільника напруги наведено на рис. 6.12.

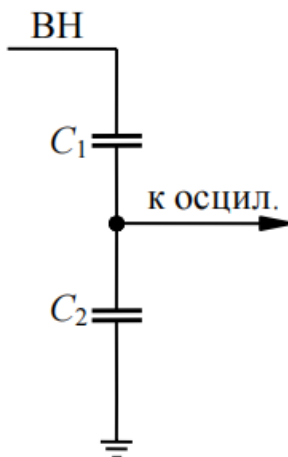


Рис. 6.12. Схема заміщення ємнісного дільника напруги

Основні недоліки ємнісного дільника: неможливо точно узгодити з кабелем, що передає, що призводить до наявності відображеного сигналу та спотворення основного; за коротких часів впливу краще, ніж омичний ДН; складнощі при розрахунку Кд.

Змішаний дільник напруги

Схема змішаного дільника напруги наведено на рис. 3.13.

Налаштувати змішаний дільник напруги складно, тому що Кд С і R повинні бути однакові (Кд С = Кд R). Важко також розрахувати Кд.

Цей дільник має переваги омичного та ємнісного дільників, тобто можна вимірювати короткі та довгі сигнали.

Недоліки: складність виготовлення та дорожнеча.

Запитання для самоконтролю

- 1. Особливості випробувальних трансформаторів**
- 2. Назвати ознаки за якими класифікуються всі схеми випрямлення**
- 3. Назвати схеми множення випрямленої напруги.**
- 4. Які розрядники використовуються для вимірювань високої напруги?**
- 5. Основні недоліки ємнісного та змішаного дільника.**

ЛЕКЦІЯ № 7 ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕНАПРУГ ТА ЗАСОБІВ ЗАХИСТУ ВІД НИХ

1. Кластфікація перенапруг
2. Внутрішні перенапруги
3. Загальне призначення заходів захисту від перенапруг
4. Заходи запобігання наслідків від атмосферних перенапруг
5. Комутаційні засоби захисту від перенапруг
6. Захист ізоляції від набігаючих хвиль
7. Засоби захисту від перенапруг

ЛІТЕРАТУРА

1. Правила улаштування електроустановок. - Видання офіційне. Міненерговугілля України. - Х. : Видавництво «Форт», 2017. - 760 с.
2. Абрамов В. Б. Техніка високих напруг: Курс лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В. Б. Абрамов, В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, О. Р. Проценко – Електронні текстові дані (1 файл: 8,95 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. –345с.
3. Акімов О. І., Сушко Д. Л. Техніка високих напруг. Ізоляція та перенапруги в пристроях електропостачання і електричної тяги залізничного транспорту: Навч. посібник. – Харків: УкрДАЗТ, 2009. – 217 с.
4. Василець С. В., Василець К. С. Техніка високих напруг: навчальний посібник [Електронне видання]. – Рівне : НУВГП, 2018. – 187 с.
5. Красько, А.С. Техника высоких напряжений (изоляция и перенапряжения): курс лекций: в 2 ч. / А.С. Красько, Е.Г. Пономаренко. – Минск: БНТУ, 2011. –Ч. 1: Электрические разряды в газах. Внешняя изоляция воздушных линий и распределительных устройств. Внутренняя изоляция. – 119 с.

Класифікація перенапруг.

Перенапряга - будь яке підвищення напруги в електричній мережі понад максимальну робочу $U_{p.макс} = U_n + (0,2 \div 0,005) \cdot U_n$ в залежності від класу напруги.

При перенапрягах створюються важкі умови для роботи ізоляції, так як вони можуть в багато разів перевищувати $U_{p.макс}$.

Перенапруги підрозділяються на:

1. зовнішні (грозові);

2. внутрішні (перехідні процеси в електричних мережах).

Необхідно знати наступні характеристики перенапруг:

1. Максимальне значення амплітуди напруг при перенапрузі

$U_{\text{макс}}$ або кратність перенапруг

$$K_n = \frac{U_{\text{макс}}}{U_{\text{р.макс}}}$$

2. Тривалість впливу перенапруги

3. Форму кривої перенапруги(аперіодична, коливальна, високочастотна і інші)

4. Широту охоплення елементів електричного кола.

Для ізоляції високовольтних улаштувань високих і надвисоких класів напруг ($U \leq 220 \text{ кВ}$) найбільш небезпечними є грозові перенапруги. Їх ізоляція витримує комутаційні перенапруги будь якої кратності.

Для ізоляції високовольтних улаштувань високих і надвисоких класів напруг ($U > 330 \text{ кВ}$) найбільш небезпечними є комутаційні перенапруги.

Тому на низьких класах напруг обмежуються спеціальними улаштуваннями тільки грозові перенапруги, а на високих класах примусово обмежують і внутрішні перенапруги.

Внутрішні перенапруги

Внутрішні перенапруги різноманітні. Причин виникнення дуже багато(відключення ліній, трансформаторів і інші перемикання, обрив фаз, к. з., перекриття ізоляторів і пробій). Вони визвані коливанням енергії, заощадженій в елементах мережі або такої, що надходить в мережу від джерел енергії(генератори, при зміні початкових параметрів).

Елементи електричної мережі: джерела енергії; накопичувачі енергії(конденсатори, індуктивності), поглиначі енергії(активні опори, корона, провідність ізоляції).

Внутрішні перенапруги діляться на комутаційні, квазістаціонарні(усталені), стаціонарні.

Умовно розвиток перенапруг графічно можна представити у відповідності з рис. 7.1.

I стадія - перехідний процес(комутаційні перенапруги). Триває декілька періодів.

II стадія- умовно усталений стан(квазістаціонарна). Перехідний процес закінчився, але параметри кола інші, тому напруга висока, а регулятори напруги на генераторах ще не встигли спрацювати.

III стадія - робота регуляторів напруги у генераторів. Зниження напруги до нової усталеної робочої напруги.

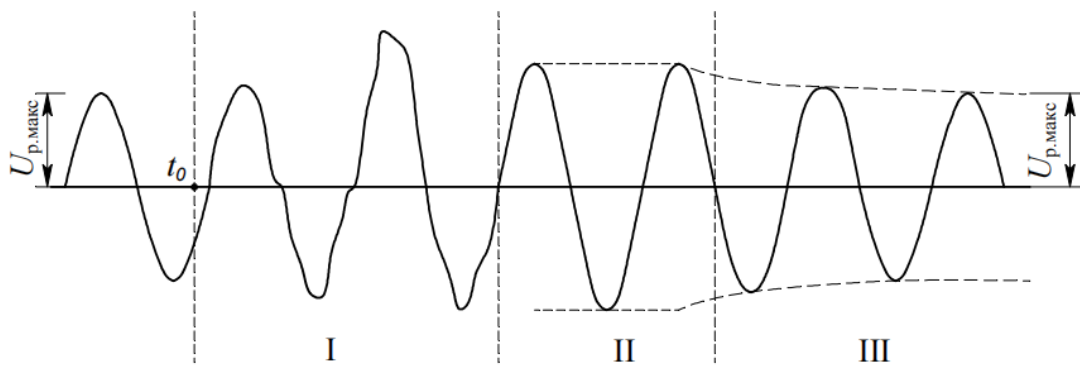


Рисунок 7.1 - Вид напруги мережі при появі внутрішніх перенапруг: t_0 - момент комутації.

Збільшення довжини і класу напруги лінії призводить до збільшення енергії в елементах мережі, і як наслідок, до збільшення кратності перенапруг. В зв'язку з цим для ліній класом ($U > 330$ кВ)

здійснюється примусове обмеження перенапруг до рівнів:

$$330 \text{ кВ} - K_n = 2,7$$

$$500 \text{ кВ} - K_n = 2,5$$

$$750 \text{ кВ} - K_n = 2,2$$

Внутрішні перенапруги в залежності від терміну дії на ізоляцію розділяються на *квазістаціонарні* і *комутаційні*. Квазістаціонарні перенапруги виникають при тимчасових з точки зору експлуатації режимах роботи і несприятливих поєднаннях параметрів мережі і можуть продовжуватись до тих пір, поки не зміниться схема або режим мережі.

Тривалість таких перенапруг – від секунд до десятків хвилин – обмежується дією релейного захисту або оперативного персоналу. *Квазістаціонарні перенапруги* ділять на режимні, резонансні, ферроре-зонансні та параметричні.

Режимні перенапруги спостерігаються при несприятливих поєднаннях діючих в електромережі електрорушійних сил. До них можна віднести перенапруги при несиметричному короткому замиканні на землю, а також при перезбудженні і розгоні генератора, які виникають у випадку раптового скидання навантаження.

Резонансні перенапруги мають місце при наближенні однієї із власних частот коливань окремих ділянок мережі до частоти вимушуючої е. р. с. Вони можуть виникати, наприклад, при односторонньому живленні лінії електропередавання. Резонансні перенапруги можуть збуджуватись також в нейтралі і фазах мережі з дугогасним реактором внаслідок резонансу в кон-

турі, який складається із індуктивності реактора і ємності мережі на землю. В неповнофазних режимах лінії з приєднаним до неї реактором або трансформатором з заземленою нейтраллю може виникати резонансний контур із ємності між фазами лінії і індуктивності реактора або трансформатора.

Ферорезонансні перенапруги можуть розвиватись в контурах, які містять ємність і індуктивність з насиченим магнітопроводом. Такі перенапруги спостерігаються як на промисловій частоті, так і на вищих і нижчих гармоніках.

Комутаційні перенапруги виникають при всіляких швидких змінах режимів роботи мережі. Вони виникають внаслідок роботи комутаційних апаратів (вмикання і вимикання елементів мережі), пробоях ізоляції (в тому числі при повторних запалюваннях дуги), а також при різкій зміні параметрів нелінійних елементів. Найбільше значення серед них мають перенапруги при комутаціях ліній електропередавання, індуктивних елементів мережі, конденсаторних батарей, а також при дугових замиканнях на землю в мережах з ізольованою нейтраллю.

Внутрішні перенапруги розвиваються за рахунок енергії підключених до мережі генераторів або реактивних елементів (L , C). Вони можуть виникати внаслідок різних резонансних процесів, аварій і комутацій елементів мережі, в тому числі і при повторних запалюваннях електричної дуги.

Зовнішні перенапруги

Зовнішні перенапруги виникають при ударах блискавки та дії інших зовнішніх по відношенню до розглянутої мережі джерел енергії.

Головним джерелом зовнішніх перенапруг в високовольтних електричних мережах є *грозові розряди*. Найбільш небезпечні грозові перенапруги виникають при прямому ударі блискавки (ПУБ) в струмопровідні елементи електричної мережі. Удар блискавки в заземлені елементи конструкції призводить до виникнення на них короткочасних перенапруг, які можуть спричинити зворотні перекидання з заземлених елементів на струмопровідні.

Індуковані перенапруги виникають внаслідок взаємного електромагнітного (індуктивного і ємнісного) зв'язку блискавки з струмопровідними і заземленими елементами мережі. Вони в більшості випадків мають меншу величину і можуть становити загрозу для мереж 3-35 кВ при ударі блискавки поблизу лінії.

Імпульси грозових перенапруг можуть також впливати на ізоляцію електроустановок, розташованих на значному віддаленні від місця удару блискавки, так як хвилі перенапруг поширюються по лінії електропередавання на значну відстань з малим затуханням.

Набігаючі хвилі можуть являти небезпеку для електрообладнання станцій і підстанцій, яке має менші запаси електричної міцності порівняно з лінійною ізоляцією.

Загальне призначення заходів захисту від перенапруг полягає в тому, щоб при мінімальних додаткових витратах отримати максимальний економічний ефект від зниження шкоди, спричиненої перенапругами, і від підвищення надійності роботи енергосистем.

Превентивні заходи захисту чинять постійний вплив на мережу. Їх призначення – запобігти виникненню перенапруг або сприяти обмеженню їх величини. Сприятлива дія превентивних заходів захисту проявляється на протязі всього перехідного процесу.

До таких заходів можна віднести використання вимикачів, робота яких не визиває виникнення великих перенапруг, грозозахисних тросів, заземлення опор на лінії електропередавання, ємнісний захист ізоляції обмоток трансформаторів і реакторів, заземлення нейтралі трансформаторів через дугогасні реактори.

Дугогасні реактори використовуються в трифазних електричних мережах з ізолюваною (компенсованою) нейтраллю (класів 3...35 кВ). Ізолювання нейтралі трифазної мережі підвищує надійність електропостачання споживачів, оскільки у випадку з'єднання фази лінії з землею (наприклад, внаслідок пробую ізоляції) лінійна напруга споживачів залишається незмінною. При цьому напруга на непошкоджених фазах зростає з фазної до лінійної в той час як напруга пошкодженої фази прямує до нуля. Напруга на нейтралі зростає до фазної напруги.

Через місце пробую ізоляції протікає ємнісний струм

$$I_c = 3U_{\phi}\omega C,$$

де C – ємність проводу лінії відносно землі, причому величина цього струму не залежить від розташування пробую по довжині лінії. Якщо до нейтралі постійно буде підключений реактор з індуктивністю L , то через місце пробую буде також протікати індуктивний струм $I_L = U_{\phi}/\omega L$. При умові $I_L = I_c$ струм однофазного короткого замикання може бути зменшений в 10...20 разів, що в ряді випадків забезпечує гасіння дуги. Якщо ж дуга періодично запалюється та згасає, в електричній мережі виникає режим «дугових» перенапруг, який характеризується коливанням напруг на неушкоджених фазах до $3U_{\phi}$ і більше.

Комутаційні засоби захисту від перенапруг, як правило, включають в себе комутуючі елементи, наприклад, іскрові проміжки. Вони спрацьовують, коли перенапруга в точці їх установлення перевищить певну критичну

величину.

До комутаційних засобів захисту відносяться вентиляльні розрядники і нелінійні обмежувачі перенапруг – ОПН (а в старих мережах – трубчаті розрядники і захисні іскрові проміжки), а також шунтуючі реактори з іскровим приєднанням. В ОПН відсутні іскрові проміжки, і високонелінійні резистори підключені до мережі постійно. Проте при підвищенні напруги на ОПН вище найбільшої робочої різко зменшується їх опір, що ефективно знижує вплив перенапруги.

Для захисту обладнання від прямих ударів блискавки використовують стрижневі блискавковідводи на підстанціях і грозозахисні троси на лініях.

Зменшення вірогідності небезпечних перенапруг при ударах блискавки в блискавковідводи і інші заземлені елементи ліній і підстанцій досягається з'єднанням їх з землею при забезпеченні досить малого імпульсного опору заземлення.

Захист ізоляції від хвиль, набігаючих по лініях електропередавання, здійснюється за допомогою вентиляльних та трубчатих розрядників або обмежувачів перенапруг нелінійних (ОПН).

Надійність захисту енергосистем від перенапруг в значній мірі визначається *станом заземлення опор повітряних ліній електропередавання* і металевих корпусів обладнання підстанцій. Заземлення являються досить відповідальними елементами мереж високої напруги. Вони забезпечують надійне електричне з'єднання з землею нейтралей трансформаторів, корпусів машин і апаратів, опор ліній електропередавання, розрядників і інших 236пристроїв.

Згідно свого призначення заземлення в високовольтних електричних мережах можна розділити на три основні типи.

Робоче заземлення забезпечує необхідне розподілення напруг і струмів в нормальних і аварійних режимах роботи мережі. В мережах 110 кВ і вище в основному використовується глухе (в ряді випадків ефективно) заземлення нейтралі, а в мережах 3...35 кВ – ізольована нейтраль або заземлення її через дугогасний реактор (та резистор).

Захисне заземлення (заземлення безпеки) призначене для захисту обслуговуючого персоналу від напруги, виникаючої на корпусах електрообладнання при ушкодженнях ізоляції, протіканні струмів к. з., а також внаслідок електромагнітних впливів мережі високої напруги.

Безпека забезпечується при заземленні, тобто, надійному приєднанні до заземлювачів металевих корпусів всіх приладів і апаратів.

Заземлювачі розташовані в землі і складаються із контуру і сітки всередині його. Контур оточує всю установку високої напруги. Він виконується із металевих полос (штаб), які прокладені горизонтально на глибині 0,5 – 0,7 м і вертикальних металевих труб або кутників, забитих вздовж полоси на глибину 2 – 3 м і більше. На відкритій підстанції всередині контуру прокладають поперечні полоси, які утворюють сітку. Вона служить для вирівнювання розподілення напруги приєднаного електрообладнання. До контуру приєднують наявні природні заземлювачі (оболонки кабелів, залізничні рейки, трубопроводи, закладні частини гідротурбін, фундаменти і заземлення опор відхідних ліній разом з тросами).

Грозозахисні заземлення призначені для захисту від зовнішніх перенапруг.

Заземлення розрядників, блискавковідводів і тросів на опорах сприяє зменшенню вірогідності перекриття ізоляції при грозових розрядах.

При спорудженні електроустановки функції робочого заземлення, заземлення безпеки і грозозахисного заземлення часто покладається на загальний заземлюючий пристрій.

Засоби захисту від перенапруг

В мережах 3-35 кВ рівні ізоляції забезпечують, як правило, досить високу надійність роботи мережі при впливі переважної більшості внутрішніх перенапруг. Головну увагу приділяють заходам грозозахисту.

Основним заходом, направленим на підвищення грозоупорності цих мереж, являється режим ізолюваної або заземленої через дугогасний реактор нейтралі.

Резервним заходом, направленим на усунення наслідків міжфазних перекриттів і перекриттів декількох фаз на землю, є АПВ (автоматичне повторне ввімкнення).

Мережі 110-220 кВ, згідно ПУЕ, також не потребують установлення спеціальних пристроїв для захисту від внутрішніх перенапруг, за виключенням особливо несприятливих схем.

Для грозозахисту використовують: троси і заземлення опор на лініях, блискавковідводи, розрядники і ОПН на підстанціях, а також посилений захист підходів ПЛ до підстанцій. Окремі точки лінії (перетини, опори з послабленою ізоляцією і т.п.) захищають розрядниками або ОПН.

Мережі 330 кВ і вище мають менші коефіцієнти запасу електричної міцності ізоляції. В них необхідно використовувати комплекс заходів для захисту як від грозових, так і від внутрішніх перенапруг.

В вітчизняних мережах використовуються глухе заземлення нейтралі, шунтуючі реактори на лініях для зниження вимушеної складової перенапруг,

електромагнітні трансформатори напруги на лініях для зняття залишкового заряду під час безструмової паузи АПВ, комбіновані вентиляльні розрядники (серії РВМК) або ОПН з характеристиками, які дозволяють ефективно обмежувати як комутаційні, так і грозові перенапруги, блискавковідводи і грозозахисне заземлення. Окрім перерахованих заходів, в ряді випадків використовують вимикачі з шунтуючими опорами (в тому числі багатоступеневої дії) і автоматичний вибір фази замикання контактів вимикача (так зване «синхронне вмикання»).

Для підвищення надійності грозозахисту ліній ультрависокої напруги використовують троси з від'ємними кутами захисту.

Найбільше старим, простим і дешевим обладнанням захисту від перенапруг спочатку були іскрові проміжки. В мережах 3...35 кВ іскрові проміжки зазвичай виконуються у вигляді «рогів». При такій формі електродів електродинамічні сили і теплові потоки повітря переміщують виниклу після перекриття дугу вгору (по рогах). Це приводить до її розтягнення і успішного гасіння.

В мережах до 35 кВ захисні проміжки мають невеликі розміри і можуть закорочуватись птахами, які сідають на електроди. З метою запобігання замикань, в заземлених спусках захисних проміжків створюються додаткові іскрові проміжки.

Іскрові проміжки наділені рядом недоліків, які обмежують їх використання. Пробивна напруга іскрових проміжків має великий статистичний розкид, що дуже затрудняє координацію пробивних напруг захисних проміжків з характеристиками ізоляції, що захищається. Внаслідок різкої неоднорідності електричного поля між електродами має місце істотне підвищення розрядної напруги проміжку при крутих фронтах хвиль діючих перенапруг.

В області малих передрозрядних часів ($t_1 \leq 2_{\text{мкс}}$) вольт-секундна характеристика ізоляції (з урахуванням статистичного розкиду) може проходити нижче вольт-секундної характеристики іскрового проміжку (рис. 7. 2).

Таким чином, при малих передрозрядних часах ізоляція залишається незахищеною і може бути пошкоджена.

Будь яке спрацювання іскрових проміжків викликає утворення дуги струму к. з., яка в мережах з глухим заземленням нейтралі, а в ряді випадків і в мережах з ізольованою нейтраллю, самовільно погаснути не може. Кожне таке к. з. викликає небажані електродинамічні дії в обмотках трансформаторів і генераторів, прискорене зношення і позачергові ревізії вимикачів, що допускають обмежену кількість відключень струмів к. з.

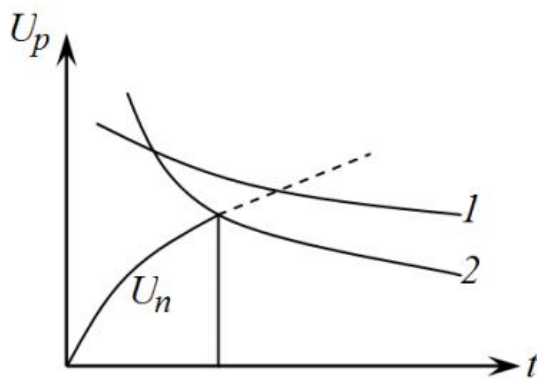


Рисунок 7. 2 – Вольт-секундні характеристики ізоляції (1) і іскрового проміжку з різко неоднорідним полем (2)

Спрацьовування іскрових проміжків, установлених паралельно ізоляції, що захищається, викликає різкий зріз напруги на ній. Це призводить до виникнення перехідних процесів і небезпечних перенапруг на поздовжній ізоляції між витками і котушками обмоток трансформаторів, реакторів і електричних машин. В теперішній час іскрові проміжки в якості спеціальних захисних пристроїв використовуються тільки в мережах з номінальною напругою не вище 10 кВ.

Проте в мережах будь якої напруги в якості захисного проміжку може виступати ізолятор повітряної лінії, якщо його імпульсна міцність виявиться нижче амплітуди напруги впливу.

Наприклад, при грозових розрядах амплі-туда хвилі перенапруги, яка рухається від точки удару блискавки, буде зрі-затись за рахунок перекриттів лінійних ізоляторів до тих пір, поки вона не стане нижче імпульсної міцності ізоляторів. Це істотно полегшує вирішення задачі захисту підстанційного обладнання від дії набігаючих по лініях грозових хвиль.

Деяке поліпшення характеристик може бути отримано шляхом змушеного гасіння дуги. Для цього іскрові проміжки поміщають в трубку із газогенеруючого матеріалу. Такий апарат захисту називається **трубчатим розрядником** (рис. 7. 3).

Розрядник має зовнішній іскровий проміжок S_1 і внутрішній S_2 , розміщений всередині трубки 1 із ізолюючого газогенеруючого матеріалу.

Дугогасіння забезпечує проміжок S_2 , утворений між стрижневим 2 і кільцевим 3 електродами. Проміжок S_1 служить для відокремлення газогенеруючої трубки від мережі. Це дозволяє уникнути розкладання матеріалу трубки під впливом струму протікання при тривалій дії робочої напруги.

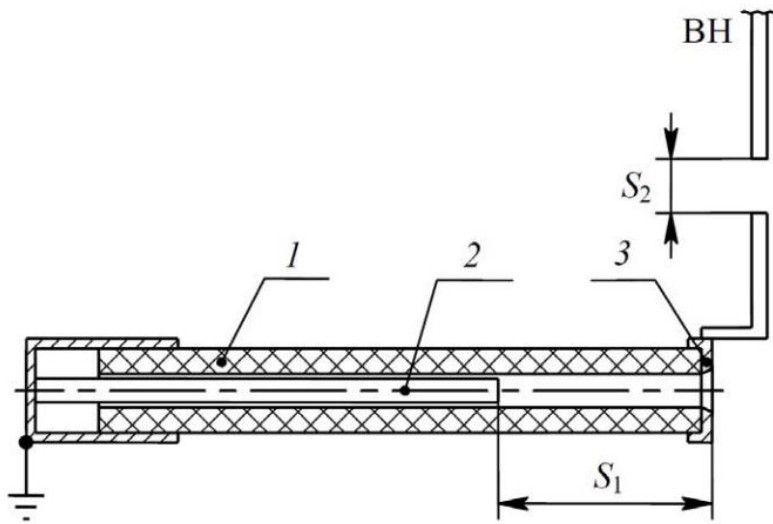


Рисунок 7. 3 - Конструкція трубчастого розрядника:

S_1 – основний проміжок; S_2 – зовнішній іскровий проміжок; 1 – діелектрична труба; 2 – стрижневий електрод; 3 – відкритий електрод.

Іскрові проміжки S_1 і S_2 пробиваються при появі перенапруг на фазному проводі. Через них протікає імпульсний струм блискавки і струм короткого замикання робочої частоти. Під дією високої температури дуги в трубці відбувається інтенсивне газовиділення і тиск в ній наростає до декількох десятків атмосфер. Гази, які виходять через відкритий кінець трубки, створюють поздовжнє дуття, і при першому ж проходженні струму через нуль дуга гасне.

Трубчаті розрядники позбавлені одного із основних недоліків захисних іскрових проміжків – утворення тривалого к. з., що відключається вимикачами мережі. Проте інші недоліки захисних проміжків (нестабільність вольт-секундних характеристик, наявність зрізів напруг) присутні і у трубчатих розрядниках. Ці недоліки, а також наявність зони вихлопу виключає можливість використання трубчатих розрядників в якості основного апарату для захисту підстанційного обладнання. Враховуючи перераховані недоліки, а також великі експлуатаційні витрати на обслуговування трубчатих розрядників, в теперішній час їх установлення на нових споруджених мережах не передбачається.

Широке розповсюдження в мережах високої напруги знайшли **вентильні розрядники**. Вони складаються із іскрових проміжків і послідовних нелінійних опорів (рис. 7. 4). В більшості вентильних розрядників паралельно іскровим проміжкам приєднуються шунтуючі резистори або ємності. Вони дають можливість керувати розподілом напруги для великої кількості послідовно з'єднаних іскрових проміжків вентильних розрядників. Шунту-

ючі резистори призначені для утворення більш рівномірного розподілу напруги робочої частоти і внутрішніх перенапруг між іскровими проміжками. Шунтуючі ємності можуть використовуватись як для вирівнювання напруги, так і для вимушеного створення більш нерівномірного її розподілу між іскровими проміжками при грозових перенапругах, що дає можливість знизити імпульсну пробивну напругу розрядників за рахунок каскадного пробоя іскрових проміжків.

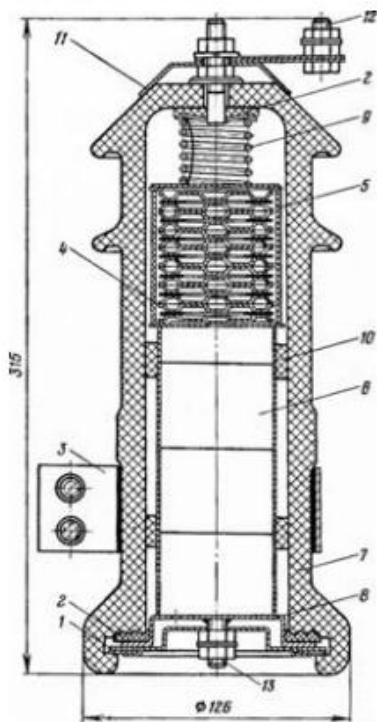


Рисунок 7. 4 - Конструкція вентильного розрядника РВ-10:

1 – нижній фланець, 2 – герметик, 3 – фланець кріплення РВ,
4 – іскрові розрядники, 5 – ізоляційний корпус розрядників, 6 – нелінійні робочі опори, 7 – корпус РВ, 8, 13 – заземлений електрод, 9 – пружина,
10 – демпфуючі прокладки, 11, 12 – високовольтний електрод

При дії на вентильний розрядник перенапруги $U_{пер}$, яка перевищує його пробивну напругу відбувається пробій іскрових проміжків (ІП), і нелінійний послідовний опір приєднується до мережі. Після пробоя ІП діюча на ізоляцію перенапруга визначається в основному падінням напруги на нелінійному опорі (залишковою напругою $U_{зал}$ на розряднику) внаслідок протікання через нього імпульсного струму. Напруга $U_{зал}$ на 20 - 30% повинна бути менше допустимої для ізоляції, що захищається.

Струм, який протікає через розрядник під дією напруги промислової частоти, називається *супровідним струмом* $I_{супр}$. Він обмежується нелінійним послідовним опором розрядника, величина якого різко зростає при зниженні

напруги на розряднику. При переході струму через нуль дуга в іскрових проміжках гасне і розрядник приходиться в початковий стан.

Таким чином, іскрові проміжки вентильних розрядників при відсутності перенапруг відокремлюють нелінійні послідовні опори від мережі і підключають їх в момент появи небезпечних для ізоляції перенапруг.

Іскрові проміжки, по можливості, повинні мати горизонтальну вольт-секундну характеристику, тобто, малу зміну пробивної напруги U_{np} в широкому діапазоні передрозрядних часів – від мікросекунд до мілісекунд – і малий розкид $U_{пер}$. Крім того $U_{пер}$ не повинна змінюватись після багаторазового пропускання нормованих імпульсних і супровідних струмів, а також при коливаннях температури і впливі тряски, ударів і вібрації. Іскрові проміжки повинні гасити дугу супровідного струму, як правило, при першому переході його через нуль.

Для виконання цих вимог в вентильних розрядниках використовують багаторазові іскрові проміжки, тобто, з'єднують послідовно велике число одиничних проміжків з малим зазором.

Це дозволяє використати властивості короткої дуги з характерним для неї катодним падінням напруги в кожному проміжку після гасіння супровідного струму. В вентильних розрядниках при найбільшій допустимій напрузі промислової частоти на одиничний іскровий проміжок приходиться від 1,0 до 1,7 кВ (діюче значення).

В теперішній час використовуються іскрові проміжки:

з нерухомою дугою супроводжуючого струму, яка гаситься практично в тому ж місці, де проходить пробій;

з дугою, яка обертається в кільцевому зазорі між електродами під дією магнітного поля, а також з розтягнутою дугою, яка, пересуваючись між електродами під дією магнітного поля, значно (в десятки і сотні разів) збільшує свою довжину.

Іскрові проміжки з нерухомою дугою використовуються в розрядниках серій РВС, РВО (РВС – розрядник вентильний станційний, РВО – розрядник вентильний полегшеної конструкції).

Їх недоліком є мала дугогасна здатність (тобто, здатність гасити дугу супровідного струму при першому переході його через нуль). Для проміжків типу РВС струм $I_{супр}$ не повинен перевищувати 80...100 А.

Збільшення $I_{супр}$ може бути допущено при переході до проміжків з обертовою дугою, які використовуються в магнітно-вентильних розрядниках серії РВМГ (розрядник вентильний магнітний грозовий) і РВМ (розрядник вентильний магнітний). Такий проміжок надійно гасить значно більші супровідні струми (до 250 А).

Це дозволяє зменшити величину нелінійного послідовного опору, а отже, і напругу, яка залишається на розряднику, що приводить до істотного покращення захисного коефіцієнта розрядника:

$$k_3 = \frac{U_{\text{зал}}}{\sqrt{2}U_{\Gamma}},$$

де $U_{\text{зал}}$ – амплітуда залишкової напруги на розряднику при протіканні через нього імпульсного струму координації;

U_{Γ} – напруга гасіння супровідного струму розрядника (діюче значення).

Подальше покращення захисних властивостей магнітно-вентильних розрядників досягається при використанні в них струмообмежуючих іскрових проміжків з розтягуванням дуги супровідного струму і введенням її в вузьку щілину, в якій відбувається інтенсивне охолодження і деонізація дуги біля стінок, в результаті чого допустимий градієнт напруги на ній значно збільшується.

Падіння напруги на дузі супровідного струму при ширині щілини 1 мм складає біля 6 кВ/м.

В перший момент, коли через розрядник протікає імпульсний струм, падіння напруги на іскровому проміжку дуже мале порівняно з напругою на нелінійному послідовному опорі.

Це дозволяє використовувати опір з меншою нелінійністю, але з більш високою пропускною спроможністю або зменшити супровідний струм розрядника.

Захисні характеристики його поліпшуються, підвищується пропускна спроможність, зменшуються габарити, вага і собівартість виробництва розрядників.

Якщо для розрядників з іскровими проміжками типу РВС захисний коефіцієнт k_3 складає 2,5 ... 2,7, то для розрядників з магнітним гасінням – 2,0, тобто при однаковій напрузі гасіння залишкова напруга на 20 ... 26% нижче.

Величина k_3 для розрядників з струмообмежуючими іскровими проміжками (РВТ, РВРД) зменшується до 1,6 ... 1,8.

Послідовний опір вентильного розрядника повинен мати нелінійну вольт-амперну характеристику і здатність багаторазово пропускати імпульсні і супровідні струми. Він обмежує супровідний струм до величини, при якій іскрові проміжки надійно гасять дугу.

Тому при напрузі гасіння величина нелінійного послідовного опору повинна бути по можливості більшою.

З іншого боку, при протіканні максимального імпульсного струму необхідно мати мінімальне значення нелінійного опору для того, щоб залишкова на розряднику імпульсна напруга не перевищувала допустиму напругу для ізоляції.

Звідси очевидно, *що послідовний опір не може бути лінійним.*

Зазначеним умовам задовольняє нелінійний опір.

При виробництві нелінійних опорів використовують тверді напівпровідникові матеріали, провідність яких миттєво зростає при збільшенні прикладеної напруги.

Нелінійні опори розрядників складаються із електротехнічного карбіду кремнію (карборунду) SiC .

Питомий опір зерен карборунда складає приблизно 10^{-2} Ом·м. На їх поверхні знаходиться напівпровідний запірний шар товщиною ~ 100 мкм із окису кремнію.

Опір запірного шару нелінійно залежить від напруженості електричного поля. При малих значеннях він складає $10^4 \dots 10^6$ Ом·м і до нього прикладається практично вся напруга.

При підвищенні напруженості поля провідність запірного шару різко зростає і загальний опір резистора починає визначатись власно зернами карборунду.

Нелінійні резистори вентиляльних розрядників пресуються в вигляді дисків із початкової маси, яка складається із порошку карбіду кремнію і зв'язуючого матеріалу.

В теперішній час використовуються диски із віліту та тервіту.

Вольт-амперну характеристику нелінійних резисторів приблизно прийнято характеризувати степеневою залежністю

$$U = C \cdot I^\alpha,$$

де C – стала, враховуюча властивість матеріалу і розмір резистора; α - показник степені, який прийнято називати коефіцієнтом нелінійності матеріалу, який має різні значення в області малих і великих струмів.

Як видно із наведеної залежності, вольт-амперну характеристику доцільно будувати в логарифмічних шкалах, в яких вона наближено зображується відрізками прямих ліній.

На рис. 7.5 показана типова вольт-амперна характеристика вілітових дисків, які використовуються в розрядниках типу РВС.

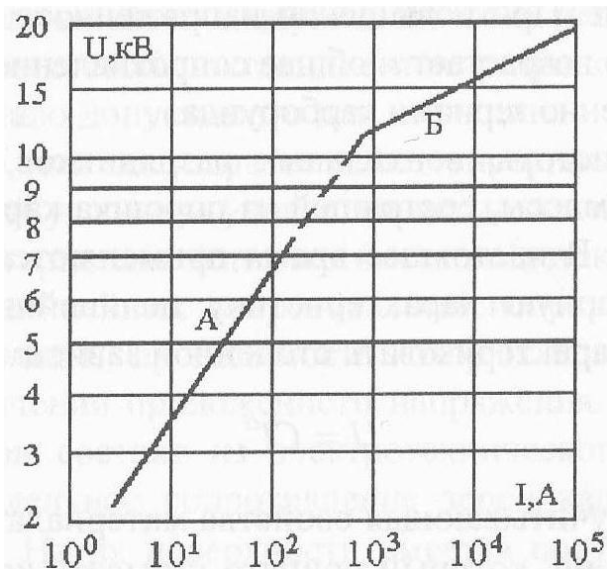


Рисунок 7.5 – Статична вольт-амперна характеристика вілітового резистора висотою 60 мм і діаметром 100 мм на імпульсах струму 20/40 мкс

Області великих струмів, які проходять через розрядник при грозових перенапругах, відповідає ділянка Б вольт-амперної характеристики.

На цій ділянці коефіцієнт нелінійності α для віліту дорівнює 0,11...0,2, для тервіту – 0,15...0,25. Ділянка А вольт-амперної характеристики відповідає області супровідних струмів і більшості струмів комутаційних перенапруг. Коефіцієнт α на цій ділянці значно вище: для віліту 0,28...0,3, для тервіту 0,35...0,38.

Вольт-амперна характеристика нелінійного опору, яка складається із m послідовно включених однакових резисторів, записується у вигляді:

$$U = m \cdot C \cdot I^\alpha.$$

Значення C і α різні для двох ділянок вольт-амперної характеристики.

Вілтові резистори, які мають відносно низьку пропускну здатність, використовуються в основному в грозозахисних розрядниках.

Тервіт має значно більшу пропускну спроможність.

В зв'язку з цим **розрядники з тервітовими резисторами можуть використовуватись для захисту як від грозових, так і від комутаційних перенапруг.**

Збільшення номінальної напруги електричних мереж і необхідність зниження рівня ізоляції обладнання потребує глибокого обмеження перенапруг.

Значне покращення захисних характеристик розрядників може бути досягнуто при відмові від використання іскрових проміжків. Це виявляється можливим при переході до резисторів з різко нелінійною вольт-амперною характеристикою і достатньою пропускну спроможністю. Таким вимогам

відповідають резистори із напівпровідникового матеріалу на основі оксиду цинку.

Захисні апарати, виготовлені із таких резисторів, мають назву обмежувачі перенапруг нелінійні (ОПН).

Високонелінійні оксидно-цинкові резистори (варистори) в теперішній час випускаються у вигляді дисків діаметром від 28 до 100 мм і більше.

Вольт-амперна характеристика варисторів дозволяє комплектувати нелінійні обмежувачі перенапруг з покращеними характеристиками без іскрових проміжків.

Нелінійні обмежувачі перенапруг, які мають кращі захисні характеристики в порівнянні з вентиляними розрядниками, все ж таки, як і вентиляні розрядники, виявляються не в змозі забезпечити обмеження перенапруг нижче деякого мінімального рівня.

Це пов'язано з особливістю нелінійних опорів, виготовлених на основі оксиду цинку. Їх характеристики можуть необоротно змінюватись під дією тривалої прикладеної напруги, якщо при цьому струм через нелінійний опір перевершує величину порядку декількох десятих долів міліампера, тому вольт-амперну характеристику ОПН приходится піднімати вгору по осі напруги до тих пір, поки струм нормального робочого режиму не понизиться до значення $\sim 0,1$ мА.

Технічно це досягається шляхом збільшення числа послідовно з'єднаних елементів нелінійних опорів.

При цьому пропорційно зростають і всі інші ординати вольт-амперної характеристики ОПН.

Наприклад, якщо при однаковій товщині дисків ОПН 220 кВ буде мати вдвоє більше послідовних елементів порівняно з ОПН 110 кВ, то і рівень обмеження грозових перенапруг при струмі 5 кА у нього буде в два рази вище, ніж у ОПН 110 кВ, тобто кратність обмеження перенапруг при заданому струмі через ОПН залишиться тією ж самою.

Деякої, досить невеликої зміни крутизни вольт-амперної характеристики вдається досягти шляхом збільшення площі дисків нелінійних елементів або паралельного з'єднання декількох ланцюжків із нелінійних елементів.

Для комутаційних перенапруг рівнем обмеження вважається напруга, відповідна деякому характерному значенню струму через ОПН на вольт-амперній характеристиці (порядку сотень ампер).

Для грозових перенапруг, рівнем обмеження вважається напруга, відповідна струмам 5 ... 20 кА:

Номинальна напруга мережі, кВ	35	110	150	220	330	500
Розрахунковий струм комутаційних імпульсів, А	350	500	500	500	700	1200
Напруга на ОПН при розрахунковому комутаційному струмі (в долях амплітуди фазної напруги)	4,05	2,0	2,0	2,0	1,93	1,84
Напруга на ОПН при грозовому імпульсі зі струмом 5000 А (в долях амплітуди фазної напруги)	4,5	2,4	2,4	2,4	2,4	2,1

Внаслідок використання високонелінійних робочих опорів (оксидно-цинкових варисторів) під тривалою дією максимальної робочої напруги через обмежувачі перенапруг протікає струм 0,4 ... 4 мА, а імпеданс їх становить десятки мегаом. Цей струм має ємнісний характер, а ємність всієї конструкції складає 30÷ 100 пФ в залежності від номінальної напруги апарату. Із збільшенням амплітуди напруги протягом ~ 1 наносекунди (10^{-9} с) опір ОПН падає на декілька порядків, переважає активна складова струму.

В результаті енергія хвилі в захищеній мережі за допомогою ОПН відводиться в землю, що різко і глибоко обмежує амплітуду перехідних процесів і тим самим забезпечує захист ізоляції.

Захист від прямих ударів блискавки

Для захисту об'єктів від ураження блискавкою використовуються блискавковідводи. Залежно від об'єкта, що захищається, застосовують стрижневі (підстанційні) або тросові (ПЛ) блискавковідводи.

Необхідною умовою ефективної роботи блискавковідводів є їхнє якісне заземлення.

Найбільші грозові перенапруги виникають при прямому ударі блискавки (ПУБ) у лінію чи підстанцію.

У місці удару виникає короткочасна (імпульсна) напруга в мільйони вольт, тобто вище імпульсної електричної міцності ізоляції електропередач та електроустаткування.

Для забезпечення надійної роботи електричної мережі необхідно здійснити її ефективний та економічний грозозахист.

Щоб бути захищеним від ПУБ, об'єкт повинен повністю знаходитися всередині простору, який є зоною захисту блискавковідводу.

Зоною захисту блискавковідводів називається простір навколо блискавковідведення, потрапляння в яке розрядів блискавки малоімовірно.

Питання для контролю

1. Дві групи перенапруг в залежності від причин їх виникнення.
2. Три види грозових перенапруг.
3. Вплив імпульсів грозових перенапруг на ізоляцію електроустановок, розташованих на значному віддаленні від місця їх виникнення.
4. Загальне призначення заходів захисту від перенапруг.
5. Комутаційні заходи захисту від перенапруг.
6. Три основні типи заземлень в електричних мережах високої напруги.
7. Переваги і недоліки іскрових проміжків як захисних апаратів від перенапруг.
8. Переваги і недоліки трубчатих розрядників як захисних апаратів від перенапруг.
9. Принцип та послідовність дії вентильних розрядників.
10. Особливості гасіння дуги в іскрових проміжках вентильних розрядників типу РВС, РВО; РВМ, РВМГ; РВТ, РВРД.
11. Захисний коефіцієнт розрядника K_z .
12. Високонелінійні оксидно-цинкові резистори (варистори).
13. Обмежувачі перенапруг нелінійні (ОПН) та їх орієнтовні характеристики

Навчальне видання

ТЕХНІКА ВИСОКИХ НАПРУГ

Курс лекцій

ПОПАДЧЕНКО Світлана Анатоліївна

САВЧЕНКО Олександр Анатолійович

Формат 60x84/16. Гарнітура Times New Roman

Папір для цифрового друку. Друк ризографічний.

Ум. друк. арк. _.

Наклад ___ пр.

ДБТУ

61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44

