

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

Кафедра електричної
інженерії



ЛІТЕРАТУРА

НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНА

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ З ДИСЦИПЛІНИ «Техніка високих напруг»

*для студентів
факультету прикладних інформаційних
технологій
та
електроінженерії*

спеціальності
**141 - електроенергетика, електротехніка
та
електромеханіка**

Тернопіль - 2023

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

Кафедра електричної
інженерії

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ **З ДИСЦИПЛІНИ** *«Техніка високих напруг»*

для студентів
факультету прикладних інформаційних технологій
та
електроінженерії

спеціальності
141 - електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Тернопіль - 2023

Лабораторний практикум з дисципліни «Техніка високих напруг» : методичні вказівки для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Укл.: О. О. Вакуленко. – Тернопіль : ТНТУ, 2023. – 87 с.

Методичні вказівки розроблені з метою засвоєння на лабораторних заняттях теоретичного матеріалу з дисципліни «Техніка високих напруг» й містять практичні вказівки до визначення основних законів і властивостей високовольтних полів, вирішення задач ефективного функціонування високовольтного устаткування, запитання для самопідготування та розраховані на отримання навиків визначення діелектричних втрат, електричної міцності високовольтної ізоляції, інтенсивності часткових розрядів, питомих електричних опорів, принципів функціонування високовольтних електроустановок і споруд на їх моделях, а також обчислення похибок високовольтних вимірювань.

Укладач: ст. викладач Вакуленко О. О.

Рецензент: к.т.н., доцент Сисак І. М..

Розглянуто й схвалено на засіданні кафедри електричної інженерії.
Протокол № 10 від 25 травня 2023 року.

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

Протокол № 11 від 07 червня 2023 року.

© Комп'ютерна верстка та відповідальний за випуск: Вакуленко О. О.,
2023 рік

ЗМІСТ

Лабораторна робота №1 Дослідження електричної міцності повітряних проміжків при змінній та постійній напругах	4
Лабораторна робота №2 Визначення електричної міцності твердого діелектрика	17
Лабораторна робота №3 Вимірювання тангенса кута діелектричних втрат високовольтної ізоляції	33
Лабораторна робота №4 Дослідження генератора імпульсних напруг	50
Лабораторна робота №5 Дослідження стаціонарних перенапруг в електричних системах з ізольованою та резонансно заземленою нейтраллю	65
Рекомендована література	86

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

1 Тема роботи:

«Дослідження електричної міцності повітряних проміжків при змінній та постійній напругах».

2 Мета роботи:

- ознайомитись з методикою високовольтних випробувань повітряних проміжків різної конфігурації електричного поля на напругу пробою;
- дослідити залежності розрядних напруг у повітрі від відстаней між електродами з врахуванням погодних умов у місці розташування експериментальної установки;
- ознайомитись з методами виявлення початкових розрядних процесів у розрядних проміжках певної конфігурації електричного поля (однорідного, неоднорідного);
- дослідити розрядний процес при наявності діелектричного бар'єру в міжелектродному проміжку.
- навчитись проводити систематизацію результатів високовольтних випробувань електричної міцності повітряних проміжків та їх математичну обробку згідно рекомендованих методик.

3 Стислі теоретичні відомості

3.1 Термінологія та визначення.

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

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

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{S}, \quad (1)$$

де S - відстань між електродами.

Атоми і молекули діелектрика характеризуються дуже сильним зв'язком між собою заряджених частинок, так що в звичайному стані всі заряджені частинки зв'язані, взаємно компенсують рух один одного і переміщення заряджених частинок на відстані, зіставні з відстанню між електродами, не відбувається. При пробі відбувається звільнення заряджених частинок, які направлено переміщуються під дією сили електричного поля, створюючи *електричний струм*.

Найбільш вивченим є пробій газових проміжків; механізми пробією рідких і твердих діелектриків відрізняються великою різноманітністю і значно складніші. В той же час саме газова ізоляція (повітря) є основним видом ізоляції в електроустановках і вивчення поведінки її в електричних полях великої напруженості має першорядне значення.

Електрична міцність газового проміжку залежить як від відстані між електродами, так і, в рівній мірі, від тиску та температури газу - погодних умов. Дуже сильно на електричну міцність ізоляційного проміжку, і не тільки газового проміжку, впливає *форма електродів*. Крім того, електрична міцність складним чином залежить від швидкості наростання напруги, визначаючи можливості пробією ізоляційного проміжку від тривалості дії прикладеної напруги.

Згідно *ступеня однорідності електричного поля*, залежного від форми електродів, розрізняють два види ізоляційних проміжків:

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

Кількісною характеристикою ступеня неоднорідності електричного поля є *коефіцієнт неоднорідності* k_n , що є відношенням максимального значення напруженості електричного поля E_{\max} в ізоляційному проміжку до середнього значення напруженості електричного поля $E_{\text{ср}}$:

$$k_n = \frac{E_{\max}}{E_{\text{ср}}} \quad (2)$$

До проміжків з СНП відносяться такі, у яких ці проміжки з електродами типу «*площина–площина*» із закругленими краями або проміжки з електродами типу «*куля–куля*», якщо радіуси куль багаті більші відстані між їх поверхнями.

До проміжків з РНП відносять проміжки, що мають $k_n \geq 3 \dots 4$. Найбільш різко вираженими ізоляційними проміжками цього типу є проміжки з електродами типу «*стрижень – площина*».

3.2 Види струмів в ізоляції і вольт–амперна характеристика газового проміжку.

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

- *ємнісні струми* при змінній напрузі, які залежать від ємності ізоляції і можуть бути великими по величині;

- *струми абсорбції* (струми різних видів сповільненої поляризації), що проявляються при постійній і при змінній напрузі;

- *крізні струми* (надзвичайно малі по величині), які протікають при постійній напрузі через тривалий час після увімкнення електроустановки.

Заряджені частинки, що входять до складу молекул і кристалічних решіток діелектрика, достатньо міцно зв'язані в речовині і за умов, близьких до нормальних, не можуть переміщатися на помітні відстані. *Крізні струми* зумовлені невеликою кількістю вільних заряджених частинок, що утворюються за рахунок зовнішніх іонізаторів; ці вільні заряджені частинки здатні переміщатися через ізоляцію від одного електроду до іншого.

У газових ізоляційних проміжках при невеликій напрузі виконується закон Ома (див. рис. 1, область I); при підвищенні напруги настає насичення, при якому всі заряджені частинки, що генеруються зовнішніми іонізаторами, досягають електродів і зростання струму при зростанні напруги не відбувається (область II), щільність струму при цьому складає приблизно $j \approx 10^{-15} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ при напруженості електричного поля близько $E \approx 0,6 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$.

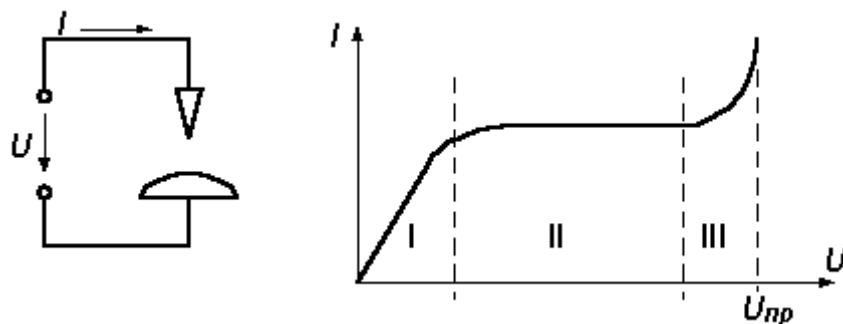


Рисунок 1 - Вольт-амперна характеристика газового проміжку

Тільки при великій напрузі, коли виникає іонізація за рахунок великої напруженості електричного поля, починається різке зростання електричного струму (область III), що приводить до незалежності розряду від зовнішніх іонізаторів, тобто до його самостійності.

3.3 Пробій ізоляції.

Дуже мала концентрація вільних заряджених частинок в діелектрику приводить до дуже малих крізних струмів в ізоляції при невеликій напрузі. При пробі концентрація вільних заряджених частинок різко підвищується. Це підвищення зумовлене такими *шістьма групами* фізичних механізмів, з яких для газів мають значення перші *чотири групи* механізмів.

При зіткненні нейтрального атома або молекули з частинкою, що рухається з великою швидкістю (найчастіше це електрон) може відбутися відрив електрона від нейтрального атома або молекули з утворенням вільного електрона і позитивного іона. Цей ефект називається *ударною іонізацією* і він відбувається, якщо кінетична енергія іонізуючої частинки перевищує енергію, необхідну для відриву електрона (енергію іонізації), $w_{кин} \geq w_i$. При такому процесі концентрація вільних зарядів збільшується і росте електричний струм. Кількість носіїв заряду

зменшується не тільки через перенесення частинок на електроди, але й через явища рекомбінації, тобто нейтралізації іону частинкою з протилежним по знаку зарядом.

Фотоіонізація в об'ємі газу має місце при дії жорсткого електромагнітного випромінювання, до якого відносяться ультрафіолетові промені, рентгенівське і гамма-випромінювання. Фотоіонізація відбувається у випадку, якщо енергія кванту електромагнітного випромінювання не менша величини енергії іонізації $h \cdot \nu \geq w_i$, де h - постійна Планка, ν - частота електромагнітного випромінювання.

При звичайних температурах в діелектриках не відбувається відриву електронів при теплових зіткненнях частинок оскільки енергії теплового руху навіть у найшвидших частинок недостатньо для іонізації. **Термічна іонізація** при теплових зіткненнях стає помітною при температурах в тисячі градусів Цельсія.

У ряді випадків відбувається **емісія електронів з поверхні електродів** (з катода), при якій електрони проникають углиб діелектрика. Розрізняють чотири види емісії:

- **термоелектронна емісія** - звільнення електронів з катода при його нагріві; на відміну від термічної іонізації тут потрібна порівняно невелика температура в декілька сотень градусів;

- **фотоелектронна емісія** - звільнення електронів при опромінюванні катода короткохвильовим електромагнітним випромінюванням (ефект Столетова); для багатьох металів достатньо опромінювання видимим світлом;

- **звільнення електронів з металу** за рахунок високої напруженості електричного поля порядку $E \sim (10^7 \dots 10^8) \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$, яка може бути реалізована на вістрях;

- **вторинна електронна емісія** - звільнення електронів з катода при бомбардуванні його важкими частинками (позитивними іонами).

3.4 Пробій газового проміжку з однорідним полем.

За рахунок дії зовнішніх іонізаторів в ізоляції будь-якого типу утворюється деяке число вільних електронів. В якості таких іонізаторів зазвичай виступають природна радіоактивність гірських порід і космічне випромінювання. Якщо в проміжку з'явиться вільний електрон, то він прискорюватиметься електричним полем; при достатньо великій напруженості поля електрон до зіткнення набуває кінетичну енергію, достатню для ударної іонізації. Після першого акту іонізації буде вже два вільних електрони; постійно зростаючий потік електронів називається **електронною лавиною**. Якщо після проходження першої лавини і поглинання заряджених частинок електродами в результаті актів вторинної іонізації з'явиться новий вільний електрон (як результат вторинної іонізації: фотоелектронної емісії з катода, фотоіонізації в об'ємі газу), то процес буде таким, що самопідтримується; такий розряд називають **самостійним розрядом**. Для ізоляційного проміжку з однорідним електричним полем це означає пробій проміжку. Мінімальна напруга, при якій відбувається повна втрата діелектриком ізолюючих властивостей, називається

розрядною напругою $U_p(U_{np})$.

Пробивна напруга газового проміжку з однорідним (ОП) чи слабонеоднорідним (СНП) електричним полем залежить як від відстані між електродами, так і від тиску й температури газу. Ця залежність визначається **законом Пашена**, згідно якого пробивна напруга газового проміжку з ОП та СНП визначається функціонально добутком тиску газу p (відносної щільності газу δ) на відстань між електродами S : $U_{np} = f_1(p \cdot S) = f_2(\delta \cdot S)$. Відносною щільністю газу $\delta = \frac{p \cdot T_0}{p_0 \cdot T}$ називають відношення щільності газу в даних умовах

до щільності газу за нормальних умов (20°C , 760 мм рт. ст.).

Спочатку закон був сформульований для залежності пробивної напруги від відстані між електродами і тиску газу; при постійності температури обидві залежності аналогічні. Характер залежності показаний на рис. 2. Мінімальне значення $(p \cdot S)_{\min}$ для нормальної температури рівне $0,57 \text{ см}\cdot\text{мм рт. ст.}$, так що нормальний тиск відповідає області, відображеній овалом на рис. 2.

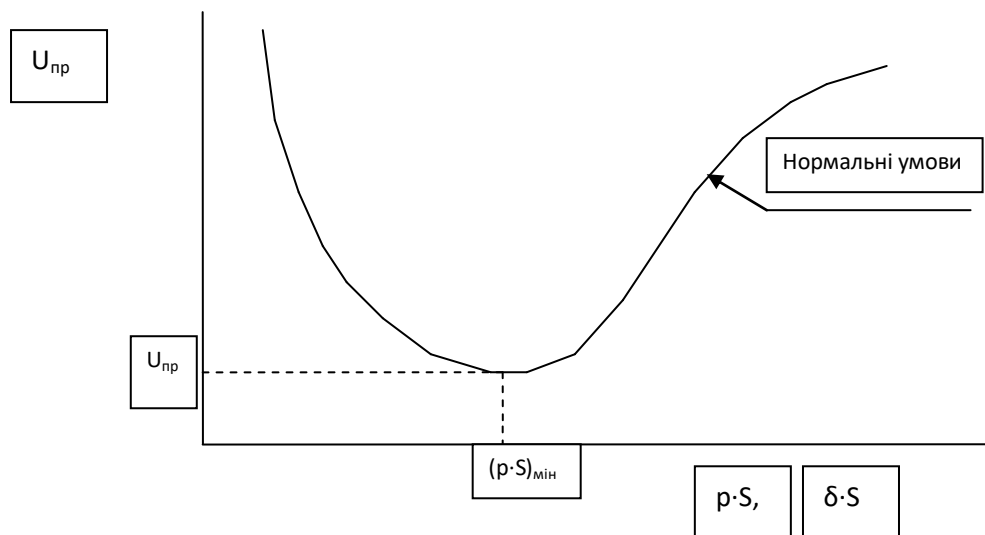


Рисунок 2 - Вид залежності закону Пашена

У цій області залежність $U_{np} = f(\delta \cdot S)$ добре апроксимується виразом:

$$U_{np} = a \cdot \delta \cdot S + b \cdot \sqrt{\delta \cdot S}. \quad (3)$$

Тут a та b - константи, які, наприклад, для повітря приймають значення:

$$U_{np} = 24,5 \cdot \delta \cdot S + 6,4 \cdot \sqrt{\delta \cdot S}, \quad (4)$$

причому, $[U_{np}] = \text{кВ}$, а $[S] = \text{см}$.

3.5 Особливості пробою газового проміжку з різконеоднорідним полем.

В проміжку типу «стрижень–площина» напруженість електричного поля біля вістря істотно більша середньої напруженості поля в проміжку. При порівняно невеликій середній напруженості поля біля вістря напруженість

настільки велика, що там може відбуватися ударна іонізація з розвитком електронної лавини і утворенням провідних каналів - стримерів. Негативні вільні електрони, що володіють великою рухливістю, відповідальні за утворення нових заряджених частинок, а малорухливі позитивні іони, що залишаються після іонізації, міняють розподіл електричного поля в проміжку. Оскільки *іонізація починається завжди біля вістря*, то при його позитивній полярності позитивний об'ємний заряд (ПОЗ) екранує вістря і затруднює розвиток іонізаційних процесів поблизу вістря, полегшуючи в той же час розвиток розряду в проміжку, що залишився, між ПОЗ і негативною площиною. При негативній полярності вістря ПОЗ поблизу нього різко інтенсифікує іонізацію проміжку поблизу вістря, затруднюючи розвиток розряду в проміжку: ПОЗ–позитивна площина.

Ці чинники визначають основні відмінності закономірностей пробою проміжку *«стрижень–площина»* від проміжку з *однорідним і слабонеоднорідним* електричними полями, які зводяться до такого:

- електрична міцність проміжку *«стрижень–площина»* *істотно менша* електричної міцності проміжку з однорідним і слабонеоднорідним електричним полем; так, за нормальних умов, електрична міцність повітря при відстанях між електродами порядку десятка сантиметрів складає приблизно $E_{np} \approx 30 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$ для однорідного поля і знижується до $E_{np} \leq 5 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$ для проміжку *«стрижень–площина»*;

- при порівняно невеликих напруженостях електричного поля в проміжку *«стрижень–площина»* спостерігається *явище корони*, тобто самостійного електричного розряду поблизу стрижня, що супроводжується свіченням і потрескуванням, при якому тільки частина проміжку стає провідною, а проміжок в цілому зберігає ізоляційні властивості;

- напруга початку корони залежить від *полярності стрижня*; при негативному стрижні корона починається при істотно меншій напрузі, ніж при позитивному вістрі;

- *ефект полярності* спостерігається і при пробі проміжку *«стрижень–площина»*: при позитивному стрижні напруга пробою в (2,0...2,5) рази менша, ніж при негативному стрижні.

Як вказувалось вище, в неоднорідних й різконеоднорідних полях іонізація починається тільки в тій частині розрядного проміжку, де присутня найбільша напруженість електричного поля. Самостійний розряд в такій області виникає у вигляді коронного розряду, а початкова напруга буде напругою запалювання коронного розряду. В слабонеоднорідних полях ($k_n = \frac{E_{\text{макс}}}{E_{\text{ср}}} \leq 3$) коронний розряд

нестійкий і швидко переходить в повний пробій проміжку. В таких полях напруга запалювання коронного розряду близька чи співпадає з напругою пробою $U_k \approx U_p$.

В різконеоднорідних полях ($k_n \geq 3$) іонізація й коронний розряд займають незначну частину проміжку поблизу електроду з меншим радіусом, коронний розряд є стійким, а розрядна напруга може бути істотно вищою коронної

$U_k \ll U_p$. Виникнення стримерного коронного розряду супроводжується свіченням області іонізації, потріскуванням й появою запаху озону.

Коронний розряд може мати дві форми – лавинну й стримерну. При цьому напруженість поля кожної з лавин значно менша напруженості зовнішнього поля. Зона іонізації при великій кількості лавин має майже однорідну структуру, що зумовлює вирівнювання електричного поля в розрядному проміжку внаслідок утвореного об'ємного заряду, знак якого співпадає із знаком «гострого» електроду.

В однорідному електричному полі число електронів n у лавині, що розвинулася від одного ефективного електрона, рівне:

$$n = \exp(\alpha \cdot x), \quad (5)$$

де x - відстань, яку пройшла лавина, см;

α – ефективний коефіцієнт ударної іонізації, см^{-1} .

Коефіцієнт ударної іонізації визначається з виразу

$$\alpha = \frac{0,2}{\delta} \cdot (E - 24,5 \cdot \delta)^2, \quad (6)$$

де E - напруженість електричного поля в області фронту лавини, $\text{кВ} \cdot \text{см}^{-1}$.

При більш інтенсивній, стримерній формі розряду, крім лавин електронів, у розрядному проміжку розвиваються стримерні канали. Якщо поле зарядів лавини стає співрозмірним із зовнішнім електричним полем у проміжку, лавини електронів перетворюються у стример. Перед головкою стримера відбувається інтенсивна фотоіонізація, яка забезпечує проростання стримера у глибину розрядного проміжку.

Коронний розряд, який розповсюджується тільки в деякій частині розрядного проміжку між електродами, ще не означає втрату ним електричної міцності, але зумовлює значні втрати енергії, корозії проводів, арматури й ізоляції, зумовлює появу шуму та радіозавад. Тому при роботі високовольтних електроустановок інтенсивність коронного розряду необхідно знижувати.

Величина розрядної напруги залежить від довжини проміжку, розмірів та форми електродів, способу їх під'єднання, щільності й виду газу, полярності та частоти напруги. Розрахунок розрядної напруги для деяких форм електродів можна проводити згідно таких наближених формул:

– електродна система «стрижень–площина»

$$U_p = (7 + 3,36 \cdot S) \cdot \delta, \text{кВ}; \quad (7)$$

– електродна система «стрижень–стрижень»

$$U_p = (14 + 3,16 \cdot S) \cdot \delta, \text{кВ}; \quad (8)$$

– електродна система «куля–куля»

$$U_p = \frac{27,2 \cdot \delta \cdot S \left(1 + \frac{0,54}{\sqrt{R \cdot \delta}} \right)}{0,25 \left[\frac{S}{R} + 1 + \sqrt{\left(\frac{S}{R} + 1 \right)^2 + 8} \right]}, \text{кВ}, \quad (9)$$

де S - відстань між електродами, см;

R – радіус кулі, см.

Висновки

Перевищення напруги на ізоляції вище за критичне значення приводить до пробую ізоляції. Значення пробивної напруги залежить від властивостей ізоляційного матеріалу, структури електричного поля в ізоляційному проміжку і швидкості наростання пробивної напруги на проміжку.

Пробій ізоляції відбувається завдяки явищам ударної іонізації, фотоіонізації в об'ємі газу, термічної іонізації, емісії електронів з катода.

Пробивна напруга газового проміжку з однорідним і слабонеоднорідним електричним полем залежить від добутку відносного тиску газу на відстань між електродами. Ця залежність характеризується зниженням електричної міцності при збільшенні відстані між електродами за умов, близьких до нормальних і має мінімум при дуже низькому тиску або дуже малих відстанях між електродами.

Розрядний проміжок з електродами типу «стрижень–площина» характеризується істотно меншою електричною міцністю в порівнянні з проміжком з однорідним і слабонеоднорідним електричним полем, наявністю явища корони і подвійним ефектом полярності. При негативному стрижні корона починається при істотно меншій напрузі, ніж при позитивному, а пробивна напруга при позитивному стрижні менша, ніж при негативному.

4 Самостійна робота

Самостійна робота виконується при підготовці до лабораторної роботи.

4.1 Отримати комплект технічної документації на прилади та установку, які використовуються при виконанні лабораторної роботи.

4.2 Ознайомитись з методичними вказівками до виконання лабораторної роботи, експлуатації приладів та установки в цілому.

4.3 В заготовці «Звіт з лабораторної роботи»

4.3.1 нарисувати схему електричних з'єднань приладів та установки в цілому, які використовуються при виконанні лабораторної роботи;

4.3.2 подати розшифровку всіх надписів та позначок на приладах та установці;

4.3.3 обміркувати і записати поетапний хід виконання лабораторної роботи;

4.3.4 обчислити похибки вимірювання фізичних величин, які визначаються приладами електричної схеми у ході виконання лабораторної роботи;

4.3.5 скласти необхідні таблиці для занесення числових значень

вимірюваних величин;

4.3.6 побудувати наближені графіки залежностей вимірюваних фізичних величин;

4.3.7 проаналізувати в комплексі хід роботи і записати нез'ясовані для себе запитання.

5. Опис дослідної установки

Лабораторна робота виконується на експериментальній установці, принципова схема якої подана на рис. 3. Джерелом високої напруги промислової частоти є випробувальний трансформатор типу ИОМ 30/10. Для заміру високої напруги використовується електростатичний кіловольтметр типу С 196/30, який під'єднується до обвитки високої напруги *ВН*. Необхідно пам'ятати, що при замірах отримують **діюче** $U_{пр\delta}, кВ$, значення напруги. Для отримання **амплітудних** значень $U_{пр\max}, кВ$ (при випробуванні на випрямленій напрузі або при зіставленні з розрахунковими значеннями) дослідні дані необхідно помножити на $\sqrt{2}$.

Плавне регулювання напруги трансформатора здійснюється регулятором напруги типу ЛАТР–2М–8А.

Увімкнення установки відбувається за допомогою рубильника видимого розриву. Доступ до електродів, які розміщені на випробувальному полі, можливий тільки при повністю відімкненій установці та накладеному переносному заземлювачі на вивід обвитки *ВН* трансформатора *Тр*.

Електроди випробувальної комірки різної форми закріплюються на ізолюючій конструкції, розташованій всередині заземленого екрану.

Резистори R_D та R_X обмежують струм розряду, захищаючи вторинну обвитку високовольтного трансформатора від струмових перенавантажень (можливе застосування дроселя індуктивного).

Пробивна напруга фіксується кіловольтметром.

Для спостереження за протіканням розрядного процесу в реальному часі мікро– наносекундного діапазону створений додатковий інформаційний канал у вигляді високочастотної феритової антени, приймаючої електромагнітний імпульс розрядного процесу, що розповсюджується у повітрі, високочастотного коаксиального кабелю та вихідного роз'єму для під'єднання цифрового осцилографа з необхідним об'ємом пам'яті.

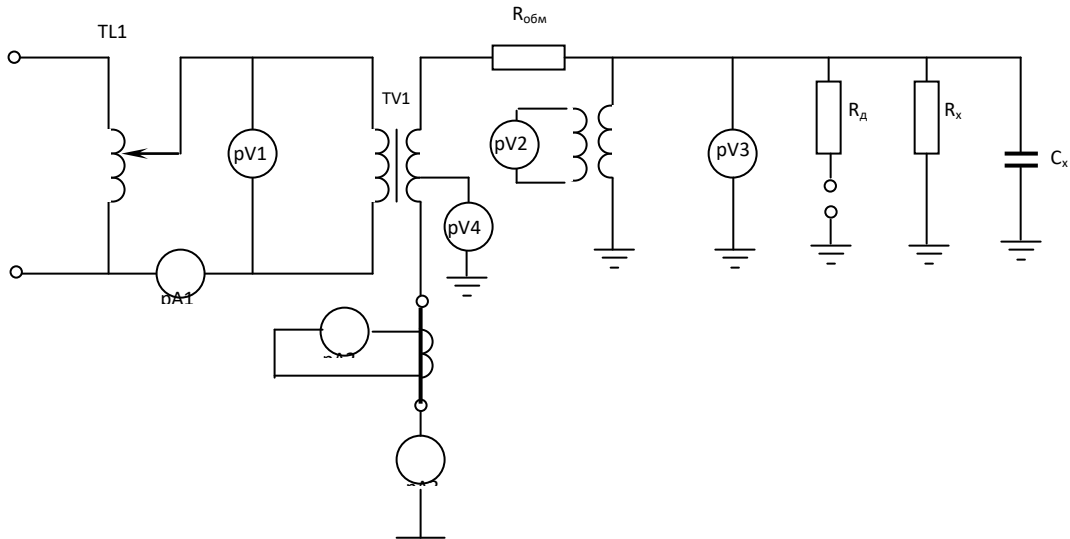


Рисунок 3 - Схема експериментальної установки:

$TL1$ – регулятор напруги; $TV1$ – високовольтний трансформатор;
 pA – амперметри; $pV1, pV2, pV4$ – вольтметри;
 $pV3$ – кіловольтметр; $R_{обм}$ – обмежувальний опір;
 R_d – додатковий опір; KP – кульовий розрядник;
 $R_x - C_x$ – електричні параметри об'єкту випробувань.

Перед проведенням випробувань необхідно визначити щільність повітря у місці розміщення експериментальної установки, для чого занотувати такі погодні умови: температуру у приміщенні (з точністю - 1^0C) й атмосферний тиск (з точністю - 1 мм рт. ст.).

У ході випробувань повітряних проміжків при незмінній відстані між електродами дослід повторюється 5 разів для визначення середнього значення пробивної напруги. При цьому тривалість паузи між повторними випробуваннями не повинна бути меншою 1 хвилини (для завершення процесу рекомбінації заряджених частинок у міжелектродному просторі). Після цього змінюється відстань між електродами і дослід повторюється.

Результати замірів пробивних напруг заносять у таблицю 1.

Таблиця 1 - Результати заміру напруги пробою розрядного проміжку

$S, \text{ см}$	$U_{пр \partial}, \text{ кВ}$					$E_{пр \partial} = \frac{U_{пр \partial}}{S},$ $\text{кВ} \cdot \text{см}^{-1}$	$U_{розр},$ кВ	$\delta = \frac{U_{макс} - U_{розр}}{U_{розр}},$ %
	U_1	U_2	U_3	U_{cp}	$U_{макс} = \sqrt{2} \cdot U_{cp}$			
Тип повітряного розрядного проміжку								

6 Завдання до виконання лабораторної роботи

6.1 Ознайомитися зі схемою установки, розміщенням її елементів, ходом виконання роботи, правилами безпеки при роботі на установці. Провести необхідні додаткові електромонтажні роботи.

6.2 Дослідити залежності $U_{пр} = f(S)$ електричної міцності повітряних проміжків від відстані між електродами при змінній напрузі промислової частоти

для таких електродних систем:

- площина – площина;
- сфера – сфера;
- стрижень – стрижень;
- стрижень– площина;
- три паралельні провідники – площина.

Отримані результати замірів занести в таблицю 1.

6.3* Дослідити електричну міцність повітряних проміжків: «сфера – сфера» та «площина – площина» при випрямленій напрузі. Зняти залежності $U_{np} = f(S)$ для проміжку „стрижень- площина” при позитивній полярності стрижня та $S = (1 \dots 15)$ см, а також при негативній полярності та $S = (1 \dots 8)$ см.

6.4* При позитивній полярності стрижня встановити відстань 6 см між стрижнем та площиною і ввести в проміжок діелектричний бар’єр. Зняти залежність $U_{np} = f(S)$ при значеннях відстані від стрижня до бар’єра $S = 1$ см; ... 6 см.

Роботи згідно пп. 6.3 та 6.4 виконати при наявності відповідного обладнання.

6.5 Привести всі органи управління установкою у вихідне положення; вимкнути установку; доповісти керівнику заняття про завершення лабораторної роботи.

7 Звіт

7.1 Подати назву лабораторної роботи, її мету та завдання.

7.2 Накреслити функціональну схему установки та принципову електричну схему її вимірювальної ланки.

7.3 Описати основні положення, покладені у принцип заміру досліджуваних фізичних величин.

7.4 Згідно проведених випробувань визначити середні арифметичні значення пробивних напруг $U_{np\text{ ср}}$ для кожної серії дослідів, значення середньої пробивної напруженості електричного поля проміжку $E_{ПР\text{ ср}}$. Отримані результати занести в таблицю 1.

7.5 Використовуючи залежності $U_{np} = f(S, \delta)$ згідно виразів (7)–(9), розрахувати значення пробивних напруг $U_{розр}$ та побудувати графічні залежності (редактор Microsoft Excel) для проміжків «стрижень – площина» й «сфера – сфера» для дослідних та розрахункових значень.

7.6 Визначити середню квадратичну похибку замірів σ та величину

довірчого інтервалу замірів β для кожного досліджуваного проміжку.

7.7 Побудувати залежність коефіцієнта неоднорідності електричного поля $k_H = f(S)$ для різних проміжків. Проаналізувати отримані залежності $U_{IP} = f(S)$ та $k_H = f(S)$ для проміжків різноманітної форми.

Отримані результати замірів занести в таблиці 1 та 2.

7.8 Порівняти дослідні та розрахункові дані; пояснити розходження між ними.

Таблиця 2 - Результати замірів розрядних напруг для різних форм електродів

Форма електродів	S, см	Експериментальні дані					Розрахункові дані	
		$U_p, кВ$			$U_{p\text{ ср}}, кВ$	$E_{\text{ср}}, кВ\cdot\text{см}^{-1}$	$U_p, кВ$	$E_{\text{ср}}, кВ\cdot\text{см}^{-1}$
		1	2	3				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Стрижень–площина								
Стрижень–стрижень								
Куля–куля								
Коронуючі кільця								
Коронуючі проводи								

7.9 Підвести підсумок виконання лабораторної роботи у висновку.

Запитання для самоперевірки

1. У чому полягають особливості електричного розряду в неоднорідних полях та чим вони зумовлені?
2. В чому полягає зміст понять: "коефіцієнт ударної іонізації", "початкова напруга" та "напруга повного розряду"?
3. В чому полягає фізичний зміст рівняння самостійності розряду?
4. Дайте визначення пробою і приведіть основні величини, що його характеризують.
5. Приведіть відмінності понять: "пробій діелектрика" та "пробій ізоляції" і відмінності їх кількісних характеристик.
6. Перерахуйте механізми пробою діелектриків.
7. Чому електрична міцність електропозитивних та електронегативних газів різна? У якому випадку вона вища?
8. Сформулюйте закон Пашена. Які причини такої залежності?
9. Чому а однорідному полі відсутня форма розряду у вигляді корони?

10. Чому електрична міцність повітряних проміжків з різко неоднорідним полем залежить від полярності електроду з малим радіусом кривизни?
11. Чим пояснюється відмінність електричної міцності повітряних ізоляційних проміжків при різних формах електродів?
12. Що таке коефіцієнт неоднорідності електричного поля?
13. Чому при замірах напруг в розрядному проміжку в якості електродів використовують кулі, а не площини?
14. Які параметри електродної системи впливають на максимальну й середню напруженість електричного поля?
15. Поясніть принцип дії дослідної установки та основні положення, покладені у хід виконання лабораторної роботи з визначення досліджуваних фізичних величин.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

1. Тема роботи

«Визначення електричної міцності твердого діелектрика».

2. Мета

Вивчення методики визначення електричної міцності твердого діелектрика (електротехнічний папір, поліетилентерефталатна плівка, полімеризований електроізоляційний лак у вигляді шару ізоляції емальованого проводу); дослідження впливу на електричну міцність кількості шарів та товщини діелектрика, просочування електротехнічного паперу трансформаторним маслом та площі електродів.

3. Стислі теоретичні відомості

3.1 Електрофізичні процеси в діелектриках при випробуваннях підвищеною напругою

Діелектрик, який перебуває в електричному полі, втрачає властивості електроізоляційного матеріалу при значенні напруженості електричного поля, що перевищує деяке критичне значення. Це явище носить назву пробою діелектрика або порушення його електричної міцності. Значення напруги, при якій відбувається пробій діелектрика, називається пробивною напругою, а відповідне значення напруженості поля – електричною міцністю діелектрика. Електрична міцність визначається пробивною напругою, віднесеною до товщини діелектрика у місці пробою:

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{h}, \quad (1)$$

де h – товщина діелектрика.

В системі одиниць СІ електрична міцність визначається як $МВ/м$ і з одиницями інших систем має такі співвідношення: $1МВ/м = 1кВ/мм = 10^6В/м$.

Пробій газу зумовлюється явищем ударної та фотонної іонізації. Пробій рідких діелектриків відбувається в результаті іонізаційних та теплових процесів. Одним з найважливіших факторів, які сприяють пробою рідин, є наявність в них сторонніх домішок. Пробій твердих діелектриків може викликатися як електричним, так і тепловим процесами, що виникають під дією електричного поля.

Явище *електричного пробою* пов'язане з електронними процесами в діелектрику, які виникають в сильному електричному полі і зумовлюють раптове місцеве зростання густини електричного струму у місці пробою.

Тепловий пробій є наслідком зменшення активного опору діелектрика під впливом нагріву в електричному полі, що викликає ріст активного струму та подальше збільшення нагріву діелектрика аж до його термічного руйнування.

При тривалій дії порівняно низької напруги пробій може бути викликаний *електрохімічними* процесами, що відбуваються в діелектрику під дією електричного поля.

Оскільки в руйнуванні рідких та, особливо, твердих діелектриків суттєву роль відіграють теплові процеси, при прикладенні до діелектриків змінної напруги числові значення пробивної напруги відносяться до діючих.

Розрізняють чотири види пробою твердих діелектриків:

- електротепловий пробій;
- електричний пробій макроскопічно однорідних діелектриків;
- електричний пробій неоднорідних діелектриків;
- електрохімічний пробій.

Кожний з вказаних видів пробою може мати місце для одного і того ж матеріалу в залежності від характеру електричного поля (постійного чи змінного, імпульсного, низької чи високої частоти), наявності в діелектрику дефектів, зокрема закритих пор, від умов охолодження, часу дії напруги.

Розглянемо явище *теплого пробою* полімерного діелектрика, яке полягає у розігріві матеріалу в електричному полі до температур, відповідних його розплавленню чи обугленню. Електрична міцність при тепловому пробіє є характеристикою не тільки матеріалу, але й виробу з нього. Пробивна напруга, зумовлена нагрівом діелектрика, пов'язана з частотою напруги, умовами охолодження, температурою зовнішнього середовища. Крім того, “електротеплова” пробивна напруга залежить від нагрівостійкості матеріалу: органічні діелектрики (полістирол, поліамід, поліметилметакрилат та ін.) мають більш низькі значення напруг, ніж неорганічні (кварц, слюда, кераміка та ін.), при інших рівних умовах внаслідок їх малої нагрівостійкості.

При *електричній формі пробою* руйнування діелектрика відбувається за рахунок електричних процесів в ньому. Електричний пробій не пов'язаний з помітною попередньою зміною діелектрика; він настає при досягненні деякого граничного значення напруженості електричного поля.

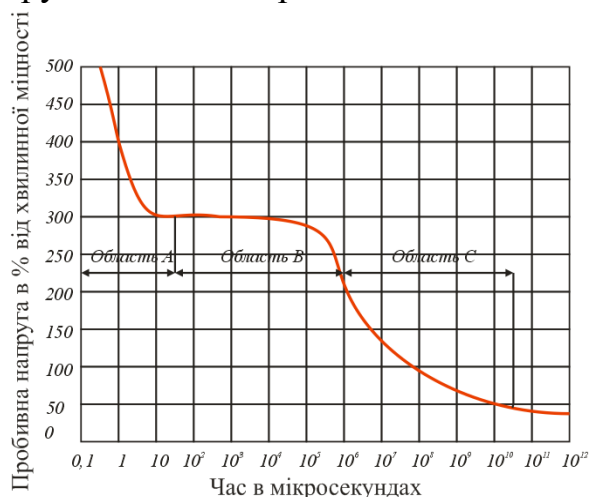


Рисунок 1 - Залежність пробивної напруги електрокартону від тривалості дії напруги

Істотний вплив на електричну міцність твердого діелектрика має час дії напруги. *Вольт-секундні характеристики* твердих діелектриків можуть помітно відрізнятися залежно від матеріалу зразка, форми поля та інших чинників. Проте з якісної сторони існує схожість таких характеристик (див. рис. 1).

В областях *A* і *B*, де розрядний час лежить в межах від мікросекунд до секунд, пробій може бути тільки електричним, оскільки ніякі інші, окрім як електричні процеси, не можуть розвиватися в такі малі проміжки часу. Зате зниження пробивної напруги в області *C* може бути пояснено лише тепловими процесами, розвиток яких проходить порівняно повільно.

Це припущення може бути підтверджене кривою залежності пробивної напруги від температури пробою (див. рис 2). В області температур, де величина пробивної напруги не змінюється, пробій буде електричним, а там, де спостерігається залежність пробивної напруги від температури, пробій може бути тільки тепловим.

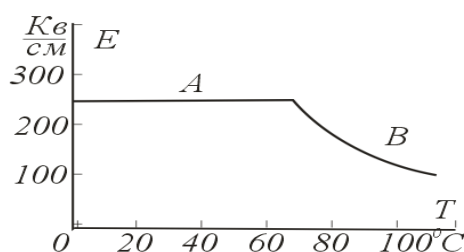


Рисунок 2 - Залежність електричної міцності E від температури для ізоляційного картону при частоті 50 Гц

В змінному електричному полі в діелектрику за рахунок діелектричних втрат і струму провідності (в постійному полі тільки за рахунок струму провідності) створюється *тепло*, яке викликає нагрів діелектрика. Найбільше розігрівання, а отже, і найбільша температура будуть в середній частині діелектрика. Викликане втратами тепло розповсюджується від середньої частини діелектрика у всі сторони. Від стінок діелектрика й від електродів тепло передається в оточуюче середовище. Якщо тепло, що виділяється в діелектрику, і тепло, що відводиться в оточуюче середовище, однакові, настає рівноважний стан і діелектрик не пробивається.

Якщо ж тепло, що виділяється в діелектрику перевищує тепло, яке відводиться від нього, рівновага порушується і відбувається нагрів діелектрика до його розплавлення або пропалу. Наступає тепловий пробій діелектрика і утворюється шлях високої провідності.

Електричний пробій діелектрика може бути тоді, коли виключені не тільки теплові процеси в ньому, але й усунені такі побічні причини, як поверхневі розряди, іонізація повітряних включень в самому діелектрику. Останнє може привести до хімічного і механічного руйнування матеріалу діелектрика і, кінець кінцем, до його теплового пробою. Електричний пробій може бути і тоді, коли до діелектрика прикладається напруга короткочасно, імпульсами.

Основними чинниками, що впливають на величину пробивної напруги при електричному пробі, є: будова самого матеріалу, форма електричного поля, вид

напруги. В однорідному полі пробивна напруга досягає граничного значення для даного матеріалу. Неоднорідність поля помітно знижує міцність діелектрика.

Фізика процесу *електричного пробою* твердих діелектриків перебуває у стані наукової розробки. Дотепер не існує єдиної точки зору на цей процес. Найбільш прийнятною з сучасної точки зору при якісному поясненні механізму електричного пробою є теорія Хіппеля. В кожному кристалі-діелектрику під впливом зовнішніх іонізаторів (проміння) є деяка кількість електронів, вирваних з атомів. Ці електрони розміщені біля позитивних іонів решітки кристалу. При накладенні зовнішнього електричного поля електрони починають переміщатися, причому їх рух буде переважно вздовж ланцюжків позитивних іонів (від негативних іонів електрони будуть відштовхуватися), по діагоналі грані куба, як це показано пунктирними лініями на рис. 3.

При своєму русі електрони зіштовхуються з іонами кристалічної решітки і передають їм накопичену кінетичну енергію. Чим частіші зіткнення, тим менша буде вірогідність накопичення електронами енергії, потрібної для іонізації. Найбільша віддача електронами накопиченої енергії буде тоді, коли вона близька до енергії власних коливань іонів. Під дією сильних електричних полів швидкість електронів, а відповідно, і їх енергія може бути більшою від енергії коливання іонів, віддача буде менша і електрони зможуть накопичити достатню енергію для іонізації та, в подальшому, для пробою діелектрика.

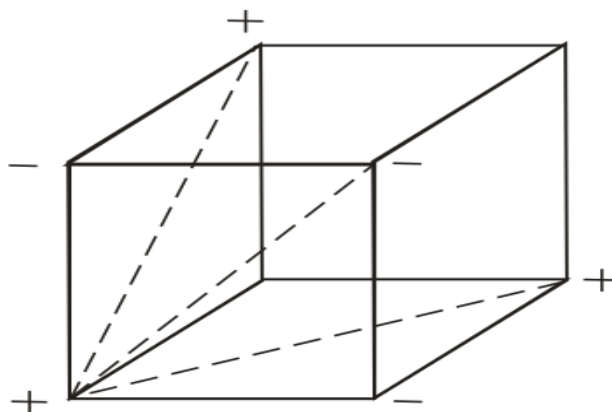


Рисунок 3 - Траєкторії переміщення електронів (пунктирні лінії) в кристалічній решітці твердого діелектрика при накладанні зовнішнього електричного поля

До цього слід додати, що позитивні заряди, які залишаються після лавини електронів повільно розсіюються, створюючи біля катода сильне поле, яке вириває з катода електрони (холодна емісія), з'являється нова електронна лавина. Дослідження Е.К.Завадовського і А.А.Воробйова підтвердили електронну природу електричного пробою твердих діелектриків.

Тверді діелектрики випробовуються на пробій при постійному струмі, змінному струмі промислової частоти, напругах високої частоти і імпульсах. В перших трьох випадках напруга плавно підіймається до пробою зразка; іноді напругу прикладають ступенями, і витримують її протягом певного часу.

Результати випробувань показують, що напруги пробою при постійному

струмі завжди більші, ніж при змінному. Однією з причин цього є відсутність діелектричних втрат при постійному струмі. Із збільшенням частоти міцність діелектрика зменшується, особливо це помітно у діелектриків з великими діелектричними втратами. При імпульсних випробуваннях, звичайно, визначають вольт-секундну характеристику ізоляції.

3.2 Складові частини випробувальних установок та основні технічні вимоги

Параметри апаратури та приладів для випробувань ізоляційних конструкцій підвищеною напругою вибираються виходячи з режимів роботи, класу ізоляції та конструктивних особливостей електрообладнання, що піддається випробуванню, області застосування та інших факторів.

Установки для випробування ізоляції підвищеною напругою змінного струму складаються з наступних основних елементів: випробувального трансформатора, регулювального пристрою та контрольно-виміральної і захисної апаратури (див. рис. 4).

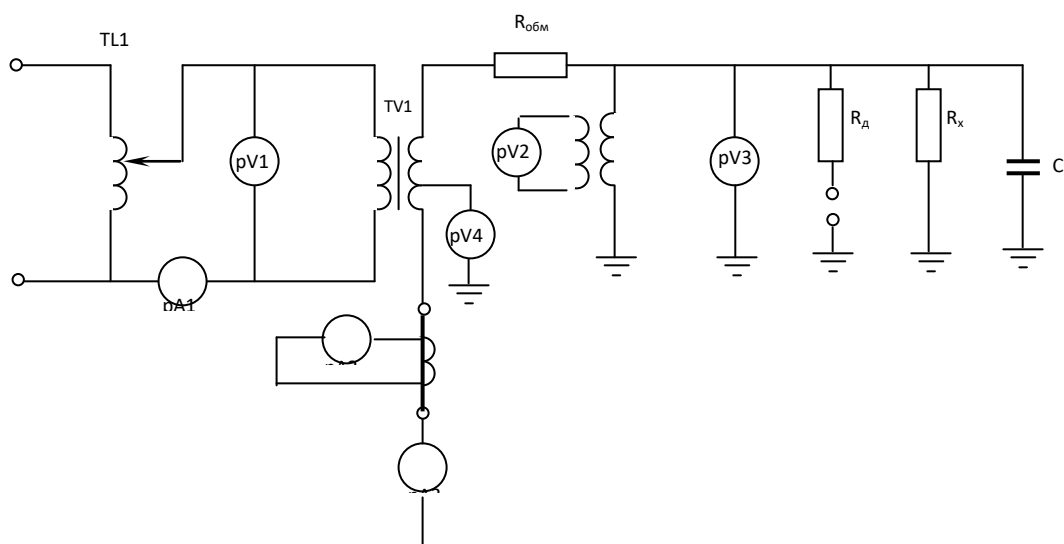


Рисунок 4 - Схема установки для випробування ізоляції підвищеною напругою промислової частоти:

TL1 – регулятор напруги; *TV1* – високовольтний трансформатор;
pA – амперметри; *pV1*, *pV2*, *pV4* – вольтметри; *pV3* – кіловольтметр;
R_{обм} – обмежувальний опір; *R_д* – додатковий опір;
R_x – *C_x* – електричні параметри об'єкта випробувань;
KP – кульовий розрядник.

Джерело живлення установки, випробувальний трансформатор і регулюючий пристрій повинні забезпечувати на випробувальному зразку синусоїдальну форму кривої напруги частоти 50 Гц з тим, щоб коефіцієнт амплітуди випробувальної напруги (відношення максимального значення до ефективного) був в межах 1,34—1.48.

Потужність випробувальної установки повинна бути такою, при якій діюче значення встановленого струму короткого замикання на стороні високої напруги

було б не менше 40mA в діапазоні напруг, на яку розрахована установка.

При виборі захисного опору слід керуватися динамічною стійкістю трансформатора. За відсутності даних про динамічну стійкість трансформатора захисний опір повинен бути в межах від $0,2$ до $1\ \Omega$ на 1В високої напруги випробувального трансформатора напругою до $110\ \text{kV}$ включно.

У момент пробою зразка повинно спрацювати реле максимального струму, що відключає первинний ланцюг трансформатора. Параметри реле максимального струму повинні бути підібрані відповідно до потужності випробувальної установки та ізоляційних властивостей випробовуваного матеріалу, щоб трансформатор не відключався до моменту пробою.

Регулюючий пристрій установки повинен забезпечувати плавне регулювання напруги. У разі неможливості отримання такої зміни, скачки напруги при регулюванні не повинні перевищувати $0,5\%$ номінальної напруги трансформатора.

Вимірювання напруги допускається проводити як на стороні високої напруги (безпосередньо на зразку) так і на стороні низької напруги. На стороні високої напруги вимірювання проводиться за допомогою кіловольтметра, вольтметра з трансформатором напруги або за допомогою вимірювального приладу, під'єданого до подільника напруги, а на стороні низької напруги — за допомогою вольтметра.

Струм, який проходить через ізоляцію при випробуванні випрямленою напругою, не перевищує $(5 \dots 10)\ \text{mA}$, що визначає вимоги до потужності трансформатора. Діюче значення напруги випробувальної установки на стороні змінного струму приблизно в $\sqrt{2}$ рази менше випробувальної напруги.

3.3 Випробування зразків ізоляційних конструкцій підвищеною напругою

3.3.1 Методика проведення випробувань підвищеною напругою.

При проведенні випробувань зразків систем внутрішньої ізоляції підвищеною напругою застосовують *три основні типи випробувань*:

- визначення *електричної міцності* зразка, при якому в його товщі розвивається електричне поле такої величини, що змушує електрони відриватися від кристалічної ґратки та розвивати енергію, достатню для руйнування всієї мікроструктури внутрішньої будови твердого тіла на шляху розвитку лавини електронів;

- визначення наявності та оцінка *розмірів мікродфектів* внутрішньої будови твердих електроізоляційних матеріалів за допомогою дослідження розрядних процесів під дією неруйнуючого електричного поля;

- визначення *стійкості поверхневих та підповерхневих шарів* зразків електроізоляційних конструкцій внутрішньої ізоляції до дії дугових розрядів, що можуть виникати як наслідок стану поверхні конструкції, так і внаслідок різного роду комутаційних перенапружень.

Визначення електричної міцності зразків електроізоляційних конструкцій проводять при плавному або ступінчатому підйомі напруги.

Швидкість підйому напруги повинна вказуватися в стандартах або

технічних умовах на матеріал у відповідності з такими вимогами:

– при плавному підйомі напруга повинна підвищуватися з нуля рівномірно так, щоб пробій відбувався в діапазоні від 10 до 20 с після початку підйому напруги. Це випробування вимагає деяких знань про матеріал або проведення одного–двох попередніх випробувань. Необхідно, щоб середнє арифметичне значення часу знаходилося у вказаному діапазоні, хоча деякі значення часу пробою можуть знаходитися і зовні приведеного діапазону.

– при ступінчатому підйомі напруги визначення електричної міцності проводять двома методами:

метод А - напруга підвищується ступенями з витримкою на кожному ступені 20 с; величина напруги вказується у технічних вимогах на випробувальну конструкцію;

метод Б - напруга підвищується ступенями з витримкою на кожній ступені 1 хв. Випробувальна напруга на першому ступені повинна складати 50% пробивної напруги, отриманої при плавному підйомі напруги.

Напругу на першому ступені подають на зразок плавним підйомом. Випробувальна напруга на кожній наступній ступені повинна підвищуватися на 10% від випробувальної на першому ступені.

Тривалість переходу від даного ступеня до іншого не повинна перевищувати 10 с. Якщо пробій відбудеться у момент підвищення напруги, пробивною повинна вважатися напруга, відповідна попередньому ступеню. За величину пробивної напруги при випробуванні на змінній напрузі приймають її ефективне значення.

Спосіб підйому напруги (плавний або ступінчатий) та число зразків повинні бути вказані в стандартах або технічних умовах на матеріал. Число випробувань на пробій повинне бути не менше 5. У разі випробування вузьких смуг і стрічкових матеріалів на електродах діаметром 6 мм кількість випробувань повинна бути не меншою 10. Якщо окремі результати відрізняються від середньої величини більш ніж на 15%, число випробувань збільшується удвічі.

Для усунення поверхневих розрядів, що виникають при випробуванні зразків на повітрі, вимірювання електричної міцності допускається проводити в трансформаторному маслі (до температури +90°C) або в іншій електроізоляційній рідині, наприклад, в кремнійорганічних рідинах типів ПМС-40, ПМС-60 (при температурі вище 90°C). Тип рідини і вимоги до неї повинні бути вказані в стандартах або технічних умовах на матеріал. Рідина не повинні впливати на випробовуваний матеріал. Для забезпечення постійності температури навколо випробуваного зразка рекомендується циркуляція рідини. Температура повинна бути виміряна в безпосередній близькості від місця розташування зразків. Пристрій з електродами для пробою твердих діелектриків у рідинах подано на рис. 5.

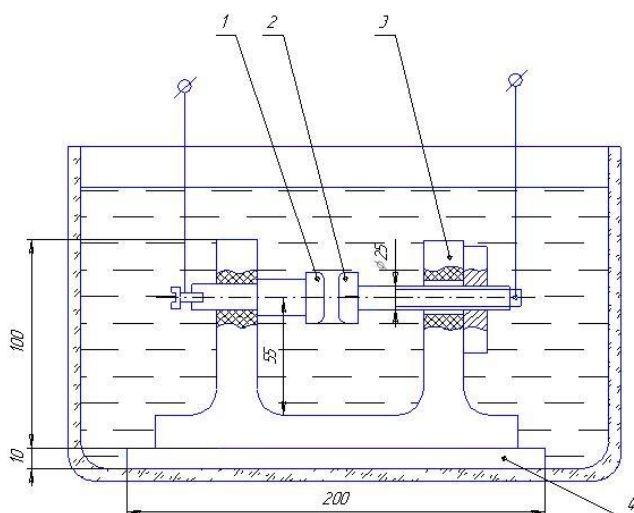


Рисунок 5 - Пристрій для вимірювання електричної міцності діелектриків у рідинах:

- 1 – нерухомий електрод; 2 – рухомий електрод;
- 3 – стійка з електроізоляційного матеріалу;
- 4 – основа з електроізоляційного матеріалу

3.3.2 Конструкції електродних вузлів та зразки для випробувань.

Електроди повинні забезпечувати добрий контакт з досліджуванним зразком. Матеріал електродів, спосіб створення контакту із зразком повинні відповідати вказаним в ГОСТ 6433.3-71 “Методы определения электрической прочности при переменном (частоты 50Гц) и постоянном напряжении”. Конструкції електродів для високовольтних випробувань зразків ізоляційних конструкцій подані в Додатку 2 цього стандарту.

Якщо електроди різної величини, більший з них повинен бути сполучений із заземленим виводом обмотки високої напруги випробувального трансформатора. Якщо обидва кінці обмотки високої напруги трансформатора ізолювані, більший електрод приєднується до виводу, потенціал якого ближчий до потенціалу землі.

При визначенні електричної міцності плоских зразків у напрямі, перпендикулярному поверхні зразка або, для шаруватих матеріалів, — перпендикулярному шарам, застосовують два електроди у вигляді циліндрів різних діаметрів. Діаметр одного з електродів повинен бути не менш ніж у три рази більшим діаметру другого електроду, або два циліндричні електроди однакових діаметрів.

Для випробування плоских зразків електроізоляційних матеріалів (крім керамічних) рекомендуються електроди наступних розмірів: один електрод діаметром 25 мм і висотою не менше 25 мм, другий електрод діаметром 75 мм і заввишки 15 мм; радіус закруглення країв електродів 3 мм. Для керамічних матеріалів рекомендованими є наступні електроди: один електрод циліндричної форми діаметром 75 мм, інший — півсферичний або сферичний діаметром 25 мм.

При необхідності створення кращого контакту на зразках з сферичними

виймаками рекомендовано застосування електродів, нанесених на зразок розпиленням металу, а також електродів з суспензії графіту у воді або лаку чи срібної пасти.

Для визначення електричної міцності вузьких смуг і стрічкових матеріалів застосовують наступні електроди:

а) два однакові циліндричні металеві електроди діаметром 6 мм з радіусом закруглення країв 1 мм. Електроди поміщають в пристосування коаксіально так, щоб зразок був затиснений між поверхнями торців. Неспіввісність верхнього електроду щодо нижнього електроду повинна бути не більше 0,1 мм. Маса верхнього електроду – (50 ± 2) г. Приклад розміщення електродів і зразка показаний на рис. 6. Для виключення перекриттів допускається приєднувати до випробовуваного зразка стрічку з електроізоляційного матеріалу, яка б перекривала краї зразка;

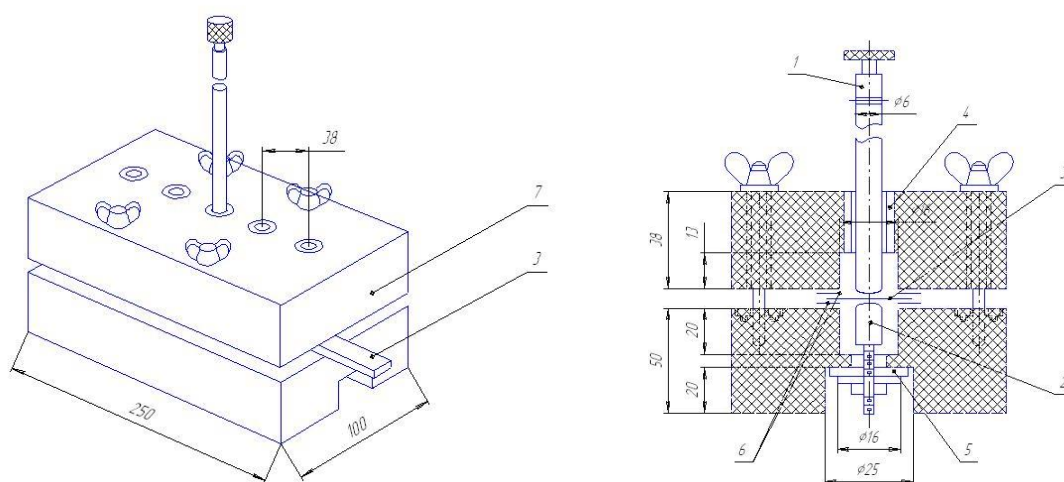


Рисунок 6 - Електроди для випробування плівкових матеріалів:

- 1 – верхній (рухомий) електрод; 2 – нижній (опорний) електрод;
- 3 – зразок; 4 – латунна вилка;
- 5 – латунна стрічка для приєднання нижніх електродів;
- 6 – стрічка з електроізоляційного матеріалу;
- 7 – корпус з електроізоляційного матеріалу

б) два однакові металеві електроди у вигляді прямокутних пластин шириною 5 мм, завдовжки 100 мм, з радіусом закруглення країв 0,5 мм. Краї електродів не повинні бути зміщені один відносно іншого. Воду застосовують тільки в тих випадках, якщо вона не проникає всередину стінок трубки і не викликає зміни електричних властивостей трубок.

Електроди діаметром 6 мм рекомендовано при визначенні електричної міцності вузьких смуг і стрічкових матеріалів.

Для визначення електричної міцності гнучких електроізоляційних трубок в якості внутрішнього електроду застосовують металеві стержні. Діаметр стержнів вибирають так, щоб трубка щільно прилягала до стержня. При щільній посадці розтягнення не допускається. В якості зовнішнього електроду застосовують смужку металеві фольги шириною 25 мм і товщиною не більше 0,025 мм, яка

повинна щільно намотуватися на трубку. При випробуванні трубок в якості внутрішнього електроду допускається застосування води, порошку графіту, які будуть забезпечувати наявність щільного контакту із стінками трубок. Воду застосовують тільки в тих випадках, якщо вона не проникає всередину стінок трубки і не викликає зміни електричних властивостей трубки. Трубки з внутрішнім діаметром більше 12 мм можуть бути розрізані і випробовуватися як смуги або стрічкові матеріали.

Для визначення електричної міцності твердих трубок з внутрішнім діаметром до 100 мм в напрямі, перпендикулярному до поверхні зразка, як зовнішній електрод застосовують смужку металевої фольги шириною 25 мм, яка щільно прилягає до поверхні трубки. Як внутрішній електрод допускається застосування металевої фольги або металевої трубки. Внутрішній електрод повинен виступати за зовнішній електрод не менше, ніж на 25 мм.

При визначенні електричної міцності циліндрів з внутрішнім діаметром більше 100 мм в напрямі, перпендикулярному до поверхні зразка, як зовнішній електрод застосовують смужку металевої фольги шириною 75 мм. Як внутрішній електрод застосовують диск з металевої фольги діаметром 25 мм щільно притертий до внутрішньої поверхні циліндра.

Зразки для випробувань не повинні мати пошкоджень, які б перешкоджали щільному приляганню електродів, а також тріщин, вм'ятин. Поверхня зразків, що піддавалася механічному обробленню, повинна бути гладкою, без вибоїн і подряпин; площини зразка повинні бути паралельними.

Оброблення зразків не повинно змінювати властивостей матеріалу. Спосіб оброблення повинен вказуватися в стандартах або технічних умовах на матеріал.

Форма, розміри, кількість зразків для випробування повинні вказуватися в стандартах або технічних умовах на матеріал з числа тих, що рекомендуються стандартом.

Визначення електричної міцності лаків проводять на зразках у вигляді плівок, нанесених на підкладку з паперу, склотканини або металеву пластину. Підкладку вибирають відповідно до стандартів або технічних умов на матеріал.

Визначення електричної міцності прес-порошків проводять на зразках, виготовлених у вигляді пластин і дисків. Товщина зразка – $(1,0 \pm 0,1)$ мм або $(3,0 \pm 0,2)$ мм. Форма і товщина зразка повинні вказуватися в стандартах або технічних умовах на матеріал.

Визначення електричної міцності керамічних матеріалів проводиться на плоских зразках.

Вимірювання товщини зразків проводиться до випробувань. Методика вимірювання товщини повинна вказуватися в стандартах або технічних умовах на матеріал. Похибка вимірювання товщини не повинна перевищувати $\pm (1\% + 0,002\text{мм})$.

Механічні операції (свердління, розточування і т. д.) проводять перед підготовкою зразків до випробування.

4. Самостійна робота

Самостійна робота виконується при підготовці до лабораторної роботи.

4.1. Отримати комплект технічної документації на прилади та установку, які використовуються при виконанні лабораторної роботи.

4.2. Ознайомитись з методичними вказівками до виконання лабораторної роботи, експлуатації приладів та установки в цілому.

4.3. В заготовці "Звіт з лабораторної роботи"

4.3.1 нарисувати схему електричних з'єднань приладів та установки в цілому, які використовуються при виконанні лабораторної роботи;

4.3.2 подати розшифровку всіх надписів та позначок на приладах та установці;

4.3.3 обміркувати і записати поетапний хід виконання лабораторної роботи;

4.3.4 обчислити похибки вимірювання фізичних величин, які визначаються приладами електричної схеми у ході виконання лабораторної роботи;

4.3.5 скласти необхідні таблиці для занесення числових значень вимірюваних величин;

4.3.6 побудувати наближені графіки залежностей вимірюваних фізичних величин;

4.3.7 проаналізувати в комплексі хід роботи і записати нез'ясовані для себе запитання.

5. Опис дослідної установки

Лабораторна робота виконується на експериментальній установці, принципова схема якої подана в Додатку 1. Джерелом високої напруги промислової частоти є установка для високовольтних випробувань УПУ-21 (УПУ-10). Для точного заміру високої напруги використовується електростатичний кіловольтметр типу С-196/30, який під'єднується до клем високої напруги установки. Необхідно пам'ятати, що при замірах отримують **дійсне** значення напруги. Для отримання **амплітудних** значень (при випробуванні на випрямленій напрузі) або при співставленні з розрахунковими значеннями дослідні дані необхідно помножити на $\sqrt{2}$.

5.1. Установка для високовольтних випробувань зразків ізоляційних конструкцій.

Зовнішній вигляд установки типу УПУ-21 для високовольтних

випробувань зразків ізоляційних конструкцій поданий на рис. 7.



Рисунок 7 - Установа для високовольтних випробувань УПУ-21

Установа вимірювальна (випробувальна) універсальна високовольтна УПУ-21 (див. табл. 1) призначена для випробування електричної міцності ізоляції напругою до 10 кВ постійного або змінного струму та оцінки струму витoku ізоляції випробуваних об'єктів. Застосовується у випробувальних лабораторіях для профілактичного контролю ізоляційних конструкцій у своєму класі напруг, а також для перевірки приладів на безпеку при сертифікаційних, періодичних, типових та інших видах випробувань.

Таблиця 1 - Технічні характеристики установки УПУ-21

Струм навантаження, мА	10
Струм спрацювання захисту, не більше, мА	30
Час зникання вихідної напруги при спрацюванні захисту, не більше, с	1
Похибка вихідної напруги постійного і змінного струмів, %	±4
Пульсації напруги постійного струму, не більше, %	5
Живлення від мережі змінного струму, В/Гц	220/50
Споживана потужність на холостому ході, В*А	500
Габаритні розміри, мм	480x295x475
Маса, не більше, кг	30
Діапазон робочих температур, °С	Від 10 до 35

Вказівки з техніки безпеки.

Увага!

Висока напруга, що розвивається установкою, небезпечна для життя!

До роботи на установці допускаються особи, які мають право працювати на високовольтних установках.

Перед роботою необхідне ознайомлення з технічним описом та інструкцією з експлуатації установки.

При роботі на установці необхідно дотримуватися особливої обережності і виконувати правила техніки безпеки.

Наявність гумових рукавичок і килимків — **обов'язкова**.

6.4 Повторити заміри для інших двох чи трьох типів зразків електроізоляційних матеріалів. Отримані результати замірів занести в таблицю 2.

6.5 Привести всі органи управління установкою у вихідне положення; вимкнути установку; доповісти керівнику заняття про завершення лабораторної роботи.

7. Звіт

7.1 Подати назву лабораторної роботи, її мету та завдання.

7.2 Накреслити функціональну схему установки та принципову електричну схему її вимірювальної ланки.

7.3 Описати основні положення, покладені у принцип заміру досліджуваних фізичних величин.

7.4 Визначити середні арифметичні значення пробивних напруг U_{cp} для кожного досліду, значення середньої електричної міцності зразка електроізоляційного матеріалу E_{cp} . Отримані результати занести в таблицю 2.

7.5 Побудувати *інтегральну* криву $M=f(U)$ ймовірності пробою зразка у функції напруги. Для цього отриманий в досліді діапазон пробивних напруг U_i розбивають на m однакових інтервалів, причому $m < n$ (рекомендується при $n=15$ прийняти $m=(5...7)$). Далі знаходять число пробойів n_k для кожного інтервалу (тут $1 \leq k \leq 7$). Визначають ймовірність p_k того, що пробой відбудеться при напрузі U_k :

$$p_k = \frac{n_k}{n} \cdot 100\% . \quad (2)$$

Для кожного інтервалу підсумовуванням визначають число пробойів M , які відбулися при напрузі U_k і більш низьких значеннях напруги:

$$M = \sum_1^k p_k . \quad (3)$$

7.6 Визначити середню квадратичну похибку замірів σ та величину довірчого інтервалу замірів β для кожного досліду.

7.7 Проаналізувати залежності $M=f(U)$ та $E=f(h)$ для досліджуваних комбінацій зразків електроізоляційних матеріалів. Порівняти дослідні та розрахункові дані.

7.8 Провести випробування на пробій полімеризованої плівки електроізоляційного лаку на зразках мідного емальованого проводу. Для цього використати пристосування для випробування *двовиткового* зразка емальованого проводу, основним елементом якого є заземлений стрижень діам. 8 мм й 5 затискачів для підведення високої напруги.

Маса натяжного вантажу для створення щільного контакту між досліджуваним проводом січенням S [мм²] й стрижнем визначається з виразу

$$m = 1 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2} \cdot S, [\text{кг}].$$

Отриманим значенням напруг пробою в кількості 22 величин присвоюється певне рангове число згідно Рекомендаційної Інструкції *LS-QW-03* фірми “Vossloh Schwabe Urbach” (“VS”) для визначення якості круглих емальованих обвиткових проводів (див. табл. 3).

Таблиця 3 - Таблиця відповідностей напруг пробою

Інтервальні значення напруг пробою, В	Рангове число
0 - 800	1
801 - 1200	2
1201 - 1600	3
1601 - 2000	4
2001 - 2400	5
2401 - 2800	6
2801 - 3200	7
3201 - 3600	8
3601 - 4000	9
4001 - 10000	10

Підсумувавши всі 22 рангові числа, отримаємо число, яке необхідно зіставити з коефіцієнтом пробивної напруги згідно Інструкції “VS” (див. табл. 4) і зробити висновок щодо якості лакового шару емальованого проводу.

Таблиця 4 - Мінімальні величини для коефіцієнта пробивної напруги

Номинальний діаметр обвиткового проводу, мм	Коефіцієнт пробивної напруги
нижче 0,200	77
більше 0,200	90
більше 0,250	102
більше 0,355	114
більше 0,450	132

7.9 Підвести підсумок виконання лабораторної роботи у висновку.

Запитання для самоперевірки

1. Дайте визначення пробою і приведіть основні величини, що його характеризують.
2. Приведіть відмінності понять: "пробій діелектрика" та "пробій ізоляції" і відмінності їх кількісних характеристик.
3. Перерахуйте механізми пробою діелектриків.
4. В чому полягає суть електричної та теплової форм пробою твердих діелектриків?
5. Як експериментально встановити ту чи іншу форми пробою?
6. Чим пояснити нелінійність залежності напруги пробою від товщини діелектрика?
7. Чому пробивна напруга зразка типу плівки залежить від площі електродів та сили міжелектродного стиску?
8. Чим пояснюється відмінність електричної міцності зразків діелектрика при різних формах електродів?
9. Як визначається коефіцієнт запасу електричної міцності?
12. Поясніть принцип дії дослідної установки та основні положення, покладені у хід виконання лабораторної роботи з визначення досліджуваних фізичних величин.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

1. Тема роботи

«Вимірювання тангенса кута діелектричних втрат високовольтної ізоляції».

2. Мета

Вивчення методики та обладнання для заміру тангенса кута діелектричних втрат ізоляції електротехнічного обладнання в умовах діючої підстанції; оцінка стану ізоляції згідно результатів вимірювань.

3. Стислі теоретичні відомості

3.1 Математична модель визначення тангенса кута діелектричних втрат високовольтної ізоляції.

В діелектрику, який знаходиться в електричному полі, виникає поляризація - явище, пов'язане із взаємодією між полем і електрично зарядженими частинками речовини. При цьому на границях діелектрика появляються заряди, протилежні зарядам, які створюють зовнішнє поле. Оскільки при поляризації відбувається переміщення заряджених частин, тому на це тратиться енергія поля.

Розрізняють декілька видів поляризації. Під дією сил електричного поля орбіти електронів незначно витягуються, атоми стають електрично несиметричними і отримують властивості електричних диполів (електронна поляризація). В просторі такий індукований диполь розміщується так, щоб його від'ємно заряджений полюс був ближче до позитивно зарядженого електроду джерела зовнішнього поля. Аналогічний механізм поляризації молекул речовин, які мають іонну структуру – іони зміщуються від положення рівноваги в напрямку поля (іонна або атомна поляризація).

Якщо речовина діелектрика має дипольну структуру, то при відсутності зовнішнього поля сумарний електричний момент в об'ємі діелектрика рівний нулю, так як різно орієнтовані диполі нейтралізують поле один одного. При появі в діелектрику зовнішнього поля диполі в своїх теплових коливаннях отримують ще й і направлену вздовж поля складову і, відповідно, утворюється деякий сумарний електричний момент дипольних молекул – дипольна поляризація речовини.

В неоднорідних діелектриках відбувається, крім того і внутрішньо шарова поляризація, що пов'язана з накопиченням (абсорбцією) зарядів на границях шарів, які відрізняються різними величинами провідності і діелектричною проникністю.

Для завершення процесу поляризації необхідний час. Види поляризації

відрізняються постійною часу поляризації τ_f . Постійна часу поляризації, або, як іноді називають, час релаксації діелектрика, є відрізком часу, протягом якого струм процесу зменшується в e разів.

Звичайно провідності шарів відрізняються на один і більше порядків, тому практично в результаті перехідного процесу ємність одного шару (з меншою провідністю) буде заряджена майже до величина напруги джерела. Схему заміщення для якісного аналізу явища поляризації можна представити у вигляді двох ємностей (рис. 1).

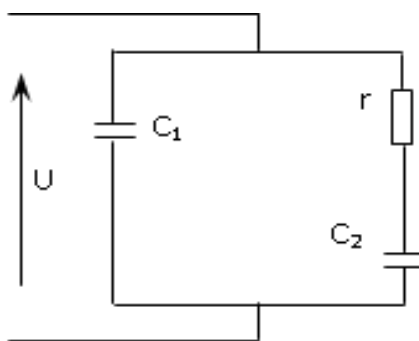


Рисунок 1 - Схема заміщення для розрахунку процесу поляризації

Ємність C_1 відповідає величині миттєво заряджених шарів діелектрика - так званої геометричної ємності ізоляції. Ємність C_2 , увімкнена через опір r , вибирається такою, щоб постійна часу ланки відповідала постійній часу реального процесу в діелектрику.

При прикладенні до діелектрика змінної напруги його поляризація буде змінюватися із зміною величини і знаку цієї напруги. При цьому, енергія, що витрачається на переміщення заряджених частин речовини, стає відчутною. Для швидких видів поляризації, тобто коли швидкість поляризації перевищує швидкість зміни напруги, при зміні знаку напруги енергія затрачена на поляризацію повністю повертається джерелу струму. При повільних видах поляризації, коли зміна поляризації відстає від змін напруги, енергія поляризації повертається джерелу не повністю, частина її розсіюється в речовині у вигляді тепла. Крім того, частина енергії зовнішнього поля невідворотно витрачається при взаємодії з ним електрично заряджених частинок речовини, які знаходяться в тепловому русі. Є ще витрати енергії, пов'язані з проходженням через діелектрик струму наскрізної провідності. Сумарна потужність втрат в діелектрику, що розсіюється при прикладанні до нього змінної напруги, називається діелектричними втратами.

Діелектричні втрати зумовлюють наявність активної складової I_a струму I_x , що проходить через діелектрик (див. рис. 2), внаслідок чого зсув фаз між напругою і струмом відрізняється від 90° на кут δ , який називається кутом діелектричних втрат. Чим більший кут δ , тим більша розсіювана в діелектрику

потужність і, відповідно, тим гірший діелектрик.

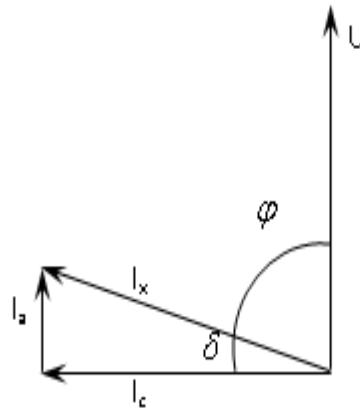


Рисунок 2 - Векторна діаграма струму, що проходить через діелектрик

Повні втрати в діелектрику:

$$P = U \cdot I_a = U \cdot I_c \cdot \operatorname{tg} \delta = \omega \cdot C_x \cdot U^2 \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (1)$$

де U - напруга, прикладена до діелектрика;

C_x - ємність об'єкта;

I_c - реактивна складова струму, що проходить через діелектрик.

Якщо повні втрати залежать від різних чинників, то стан ізоляції характеризується лише величиною тангенса кута діелектричних втрат:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P}{U \cdot I_c} = \frac{I_a}{I_c}, \quad (2)$$

На практиці величину $\operatorname{tg} \delta$ замість абсолютного значення часто виражають у відсотках: $\operatorname{tg} \delta_{\%} = 100 \cdot \operatorname{tg} \delta$.

Втрати на іонізацію, як правило, вважають лінійно-залежними від напруги:

$$P_2 = k \cdot (U - U_2).$$

Діелектричні втрати залежать від квадрату напруги:

$$P_d = m \cdot U^2.$$

Загальні втрати в діелектрику з іонізацією:

$$P_x = P_1 + P_d = k \cdot (U - U_1) + m \cdot U^2.$$

Враховуючи (2), можна записати:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{k \cdot (U - U_2) + m \cdot U^2}{\omega \cdot C_x \cdot U^2}. \quad (3)$$

Втрати в діелектрику значно залежать від температури, причому ця залежність для різних ізоляційних матеріалів і конструкцій неоднакова. В більшості випадків в діапазоні додатних температур ((20...80)⁰C) $\operatorname{tg} \delta$ зростає згідно експоненційного закону:

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_0 \cdot e^{\alpha \cdot (t - t_0)}, \quad (4)$$

де $tg\delta_0$ - втрати при температурі t_0 (зазвичай, $20^{\circ}C$);

$tg\delta$ - втрати при температурі t ;

α - коефіцієнт, що залежить від типу діелектрика, конструкції та ін.

У зв'язку із невизначеністю коефіцієнта α в практичних цілях для більшості видів ізоляції температурний перерахунок результатів вимірів $tg\delta$ проводити недоцільно. Як правило, нормується величина $tg\delta$ при температурі $20^{\circ}C$. Тому і вимірювання $tg\delta$ необхідно проводити при температурах, близьких до нормованої (від $+10$ до $+30^{\circ}C$).

Температурний перерахунок $tg\delta$ можливий тоді, коли для об'єктів даного виду встановлена конкретна залежність втрат від температури і наявні статистичні усереднені дані (таблиці або перерахункові формули) для значної кількості об'єктів (як наприклад, трансформаторів).

Величина $tg\delta$ дає усереднену об'ємну характеристику стану діелектрика.

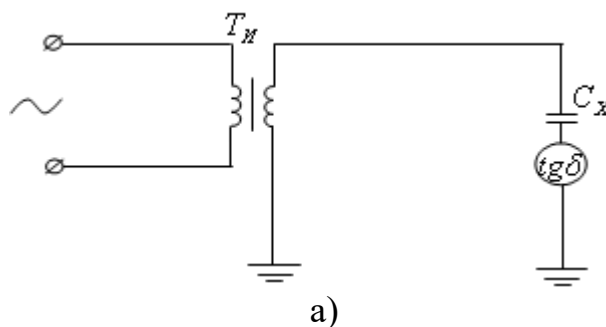
3.2 Мостові схеми змінного струму

Установки для вимірювання діелектричних втрат розрізняються як по типу вимірювальної частини (мостова, ватметрова схеми і т. д.), так і по місцю увімкнення вимірювального елемента в ланцюг струму об'єкта (нормальна, перевернена і зворотна схеми).

Нормальною схемою включення (див. рис. 3, а)) називається схема, в якій вимірювальний елемент розташований між одним із електродів об'єкта C_x і заземленням. Вимірювальний елемент, увімкнений згідно нормальної схеми, знаходиться під низьким потенціалом щодо землі. Екранування схеми може бути здійснене найбільш просто і ефективно, тому нормальну схему включення застосовують у всіх випадках, коли є можливість ізолювати від землі обидва електроди об'єкта (при вимірюваннях в лабораторних умовах, на обладнанні в процесі монтажу, на устаткуванні, яке має спеціальні виводи для вимірювання $tg\delta$ і т. п.).

Переверненою називається схема установки (рис. 3, б)), в якій вимірювальний елемент під'єднаний в провід високої напруги від випробувального трансформатора до об'єкта. Ця схема дозволяє проводити вимірювання об'єктів, у яких один з електродів наглухо заземлений.

Перевернена схема є основною, що застосовується в експлуатаційних умовах. Недоліком переверненої схеми є те, що вся вимірювальна частина знаходиться під високою напругою. Це ускладнює конструкцію вимірювальної установки і її екранування, оскільки екрани знаходяться під високою напругою.



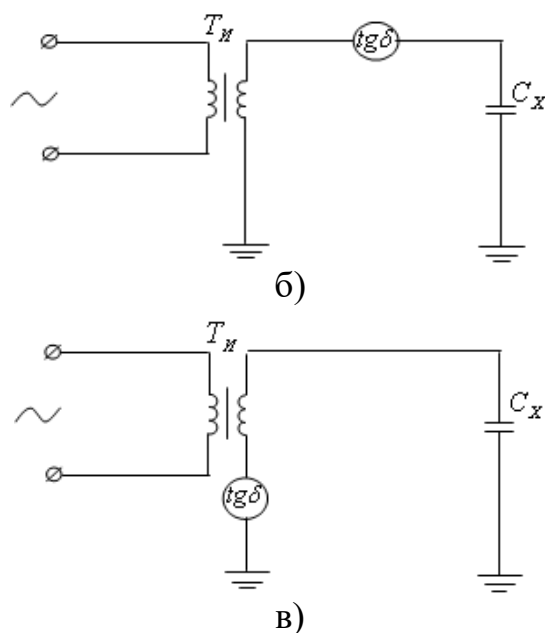


Рисунок 3 - Схеми під'єднання вимірювального елемента:
 а) – нормальна схема; б) – перевернена схема;
 в) – обернена схема

Зворотна (обернена) схема установки (рис. 3, в) відрізняється тим, що вимірювальний елемент під'єднується в заземлення випробувального трансформатора. Зворотна схема, як і перевернена, дозволяє проводити вимірювання об'єктів, що мають один заземлений електрод. Проте конструкція випробувальної установки в цьому випадку ускладнена: необхідний спеціальний екранований трансформатор і екранований провід з високовольтною ізоляцією. Широкого розповсюдження зворотна схема не отримала.

Вимірювальна установка, призначена для вимірювання діелектричних втрат в експлуатаційних умовах, повинна допускати під'єднання як по нормальній, так і по переверненій схемам.

Для визначення величини діелектричних втрат ізоляції, як це витікає з векторної діаграми і формули (2), необхідно провести одне із наступних вимірювань:

- вимірювання кута δ (або додаткового йому кута φ) з наступним визначенням $tg\delta$;
- вимірювання потужності втрат P_a і реактивної потужності $Q_p = U \cdot I_C$;
- вимірювання величини активної I_a і реактивної I_C складових струму.

Найбільшого розповсюдження в якості вимірювальної частини установок для вимірювання діелектричних втрат ізоляції отримали високовольтні мости змінного струму. Високовольтний міст є найбільш точним із існуючих пристроїв; значення $tg\delta$ отримується безпосередньо при вимірюванні без додаткових розрахунків.

Активну і реактивну потужності можна виміряти за допомогою ватметрової установки, що складається з ватметра, амперметра і вольтметра.

Ватметрова установка дає в порівнянні з мостовими схемами меншу

точність вимірювань, проте у ряді випадків ця точність достатня для експлуатаційних цілей. Область переважного застосування ватметрових установок – вимірювання $tg\delta$ об'єктів з великою ємністю.

В останній час розроблені установки для вимірювання $tg\delta$ з використанням векторметра, в якості якого застосовується фазочутливий міліамперметр або вольтметр. Векторметром вимірюють активну і реактивну складову струму об'єкта. Точність такої установки на даний час невисока і може бути співставлена лише з точністю застосованих для експлуатаційних вимірювань мостів низького класу. Основна перевага цих установок - підвищена завадостійкість, що дозволяє застосувати їх для масових бракувальних вимірювань ізоляції.

Вимірювання комплексних опорів найчастіше здійснюють за допомогою мостових схем змінного струму. Мостові схеми належать до пристроїв зрівноважування, особливістю яких є те, що в процесі вимірювання проводиться зрівнювання згідно модуля і фази напруги на вимірюваному об'єкті (або на його ділянці) з відомою напругою. Блок-схема пристрою зрівноважування показана на рис. 4. Напруга від генератора подається на об'єкт вимірювання і вимірювальну схему.



Рисунок 4 - Блок-схема пристрою зрівноваження

Вимірювальна схема має органи регулювання по модулю і фазі й служить для отримання напруги, яка зрівнюється з напругою, знятою з об'єкта вимірювання. Зрівнювальні напруги подаються на показник рівноваги, який відмічає момент їх рівності. Інакше кажучи, в мостових схемах відбувається порівняння вимірюваного комплексного опору зі зразковим методом використання напруги на цих опорах. При цьому зміни порівнювальних напруг в результаті змін напруги живлення мостової схеми не позначаються на похибках вимірювань.

Результати вимірювання визначаються за показниками регулювальних органів вимірювальної схеми. Такий метод вимірювання, в порівнянні з іншими методами, забезпечує високу точність, тому що похибка визначається в основному зразковими мірами вимірювальної схеми, які служать для одержання напруги порівняння, а на сьогоднішній день зразкові міри можуть бути виконані з достатньою точністю. Але все ж таки основна трудність при

побудові пристроїв зрівноважування полягає в проектуванні вимірювальної схеми, яка має постійні і змінні зразкові міри.

3.3 Методи контролю високовольтної ізоляції шляхом вимірювання $tg\delta$ та ємності

Величина $tg\delta$ є узагальненою характеристикою стану ізоляції, оскільки активна складова струму, яка викликається діелектричними втратами у місцевому дефекті, при вимірюванні відноситься до загального ємнісного струму конденсатора. Як правило, вимірювання $tg\delta$ дозволяє виявити загальне погіршення ізоляції. Місцеві дефекти, а також зосереджені дефекти погано виявляються вимірюванням $tg\delta$. При вимірюваннях $tg\delta$ оцінка стану конденсаторів повинна проводитися за його абсолютним значенням з врахуванням характеру зміни $tg\delta$ і ємності порівняно до значень, що отримані при попередніх вимірюваннях або значень нормованих для температури 20°C з виконанням температурного перерахунку.

Вимірювання ємності ізоляції крім інформації про зміну структури ізоляції, що викликає зміну процесів поляризації, дозволяє виявити і місцеві грубі дефекти (пошкодження частини ізоляції). Ступінь вияву дефектів також залежить від співвідношення між об'ємами ушкодженої і неушкодженої частин ізоляції.

Мостовий метод. Заводами-виробниками рекомендовано для вимірювання $tg\delta$ і ємності використовувати схему моста Шерінга (див. рис. 5). В схемі, крім ізоляції з ємністю C_x , що випробовується, також міститься зразковий конденсатор (ємність C_0) з дуже малими діелектричними втратами (газова ізоляція). При регулюванні опору R_2 і ємності конденсатора C_1 вдається отримати рівновагу моста. При цьому

$$tg\delta = \omega \cdot C_1 \cdot R_1; \quad C_x = C_0 \cdot \frac{R_1}{R_2}. \quad (5)$$

Міст Шерінга характеризується високою точністю проведення вимірювання, надійністю і простотою у використанні. Детальніше принцип роботи моста розглянуто нижче.

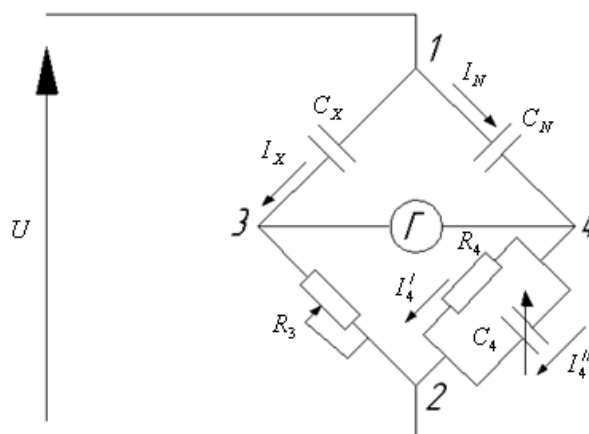


Рисунок 5 - Схема моста змінного струму Шерінга

Неврівноважено-компенсаційний метод. Цей метод можна застосовувати у батареях, що складаються з трифазних конденсаторів, які мають з'єднання «зірка»; він дозволяє визначити зміни $tg\delta$ і ємності ізоляції.

При дефекті ізоляції струм несиметрії $I_{НС}$, зумовлений провідностями Y конденсаторів 1-3 (див. рис. 7) збільшиться на величину ΔI і складе:

$$I'_{I\bar{N}} = I_{I\bar{N}} + \Delta I. \quad (6)$$

В покази також включається струм впливу, зумовлений провідностями Y_6 , які еквівалентні частковим ємностям 4-6 цих об'єктів відносно шинування сусідніх апаратів, а також елементів розподільчих пристроїв.

Після компенсації струму небалансу і усунення завад від вищих гармонік струм на виході суматора ΔI буде пропорційний зміні провідності ізоляції об'єкту ΔY_d :

$$\Delta I = k_C \cdot \Delta Y_{\bar{A}} \cdot U_{\delta}. \quad (7)$$

При цьому вектор I_0 (див. рис. 7) характеризує стан ізоляції в початковому стані (прийнято, що $k_C=1$); вектор I – після зміни параметрів, що контролюються. З векторної діаграми випливає

$$\frac{\Delta I_a}{I_0} \approx \Delta tg \cdot \delta; \quad \frac{\Delta I_p}{I_0} \approx \frac{\Delta C}{C_0}. \quad (8)$$

Таким чином, при вимірюваннях виконується контроль за зміною діелектричних втрат і ємності ізоляції. Похибки вимірювання цим методом залежать від величини і стабільності залишкового струму небалансу $I_{НС}$, що виникає через небаланс схеми, неточність симетрування і якість фільтрації завад при наявності вищих гармонік.

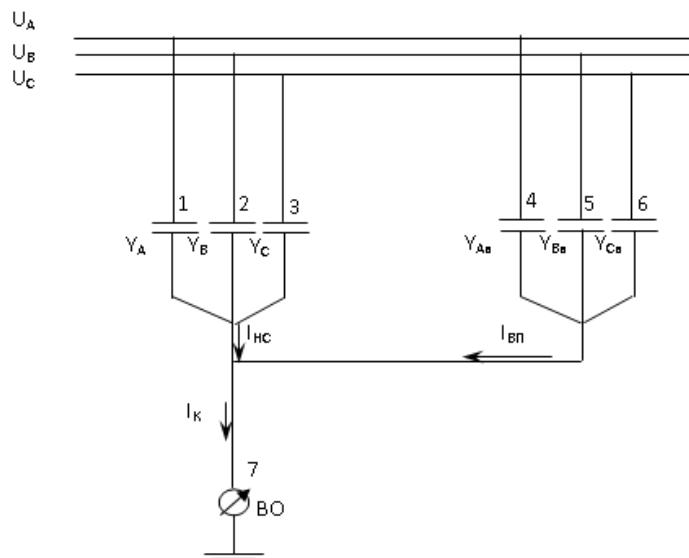


Рисунок 6 - До розрахунку схеми вимірювання неврівноважено-компенсаційним методом

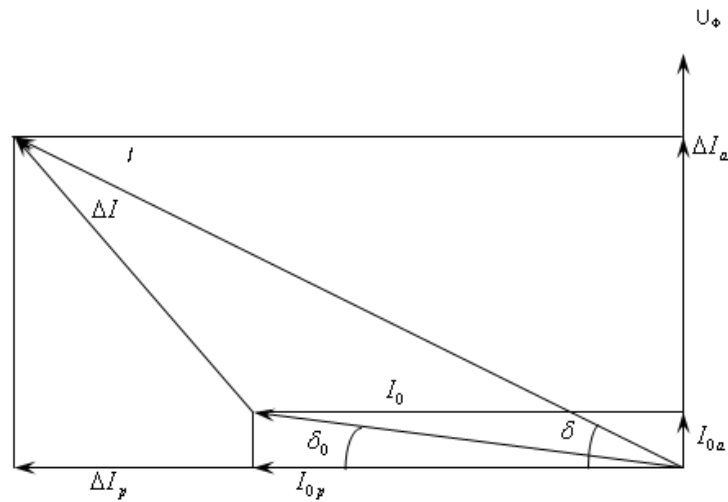


Рисунок 7 - Векторна діаграма струму через ізоляцію об'єкта

Ватметровий метод. Ємність і $\operatorname{tg} \delta$ ізоляції за цим методом визначаються розрахунком за результатами вимірювання потужності діелектричних втрат і струму через ізоляцію.

Кола напруги ватметрової схеми (див. рис. 8) живляться від вторинної обвитки робочого трансформатора напруги (ТН), а в кола струму через узгоджувальний трансформатор струму (ТС) подається струм, що контролюється.

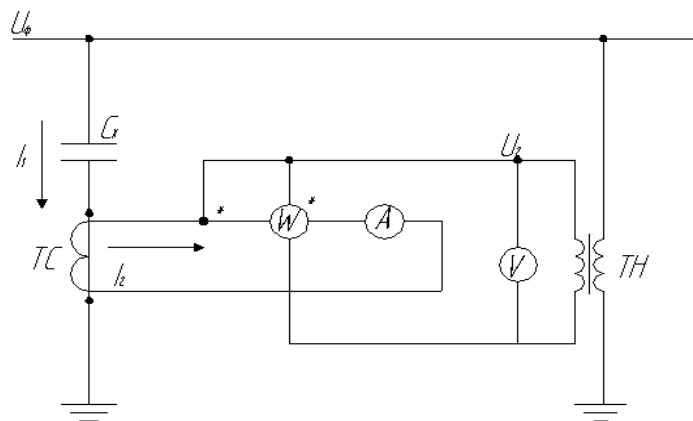


Рисунок 8 - Ватметрова схема для вимірювання $\operatorname{tg} \delta$ і ємності ізоляції

Результати вимірів діелектричних характеристик розраховуються за формулами

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P_2}{U_2 \cdot I_2}; C_x = \frac{k_T}{\omega \cdot k_H} \cdot \frac{I_2}{U_2}, \quad (9)$$

де P_2, I_2, U_2 – покази ватметра, амперметра та вольтметра, відповідно;
 k_T і k_H – коефіцієнти трансформації ТС і ТН;
 ω – кутова частота напруги в мережі.

Постійно встановлені прилади, крім визначення ємності і тангенса кута втрат, дозволяють контролювати значення прикладеної напруги та струму, тобто оцінювати режим роботи конденсаторів. Збільшення струму в колі батареї без пропорційного йому підвищення напруги в мережі, вказує на перевантаження конденсаторів вищими гармоніками, а зменшення струму - на від'єднання частини конденсаторів або конденсаторних секцій їх запобіжниками.

4. Самостійна робота

Самостійна робота виконується при підготовці до лабораторної роботи.

4.1. Отримати комплект технічної документації на прилади та установку, які використовуються при виконанні лабораторної роботи.

4.2. Ознайомитись з методичними вказівками до виконання лабораторної роботи, експлуатації приладів та установки в цілому.

4.3. В заготовці "Звіт з лабораторної роботи"

4.3.1 нарисувати схему електричних з'єднань приладів та установки в цілому, які використовуються при виконанні лабораторної роботи;

4.3.2 подати розшифровку всіх надписів та позначок на приладах та установці;

4.3.3 обміркувати і записати поетапний хід виконання лабораторної роботи;

4.3.4 обчислити похибки вимірювання фізичних величин, які визначаються приладами електричної схеми у ході виконання лабораторної роботи;

4.3.5 скласти необхідні таблиці для занесення числових значень вимірюваних величин;

4.3.6 побудувати наближені графіки залежностей вимірюваних фізичних величин;

4.3.7 проаналізувати в комплексі хід роботи і записати нез'ясовані для себе запитання.

5. Опис дослідної установки

Лабораторна робота виконується на експериментальній установці, схема якої подана на рис.9. Схема установки для вимірювання діелектричних втрат високовольтної ізоляції на базі моста змінного струму Р5026 містить наступні

основні пристрої (див. рис. 9): вимірювальна частина $ВЧ$, випробувальний трансформатор T_B , фазорегулятор Φ , регулятор напруги P_H і перемикач Π для зміни фази напруги живлення на 180° .

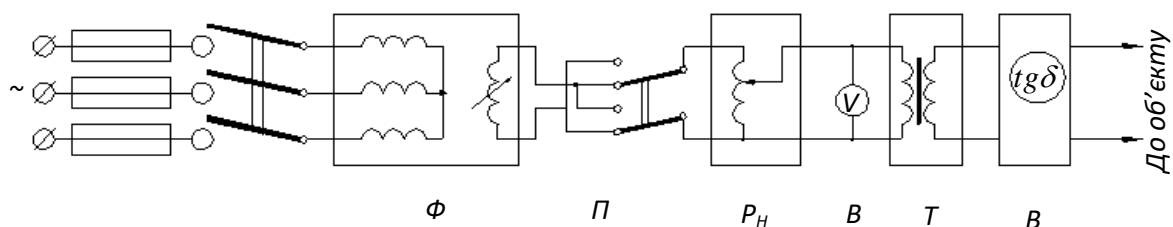


Рисунок 9 - Блок-схема вимірювальної установки
(розшифрування позначень – див. нижче)

Для контролю величини напруги, що подається на об'єкт при вимірюванні, необхідно мати вольтметр pV (позн. – B) в ланцюзі випробувального трансформатора TV (позн. – T). Фазорегулятор Φ потрібен лише в установках, призначених для вимірювань в умовах сильних впливів електричного поля, тобто в установках з напругою 110 кВ і вище. Вимірювальна частина установки, як правило, містить власне вимірювальний елемент, по якому проходить струм об'єкту (струмова обмотка ватметра, плече порівняння моста і т. п.), і допоміжні елементи (ланцюги напруги ватметра, еталонний конденсатор моста і т. д.).

5.1. Математична модель вимірювання $tg\delta$ і ємності силових конденсаторів мостом змінного струму Шерінга.

В практиці випробувань, як було вказано у розділі 3, найбільш широкого застосування отримала схема моста Шерінга. Принципова схема моста Шерінга приведена на рис. 10.

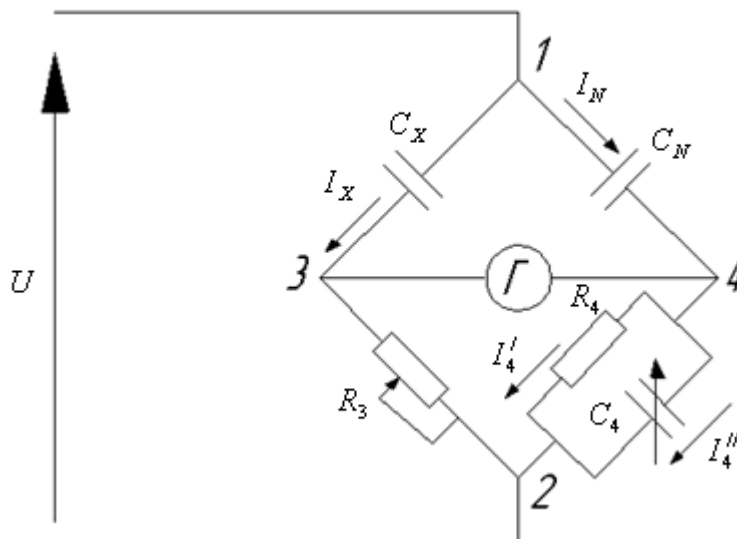


Рисунок 10 - Принципова схема моста Шерінга

Одним плечем моста є вимірювальний об'єкт C_x , друге плече утворене зразковим конденсатором C_N . Вимірювальним елементом в мостовій схемі є плече $Z_3 = R_3$, через який протікає струм, спільний з об'єктом. Четверте плече Z_4 утворене постійним опором R_4 , паралельно якому під'єднано магазин ємностей C_4 . Показчиком рівноваги (нуль-індикатором), зазвичай є гальванометр Γ у різному схемотехнічному виконанні, увімкнений безпосередньо в діагональ моста.

Особливістю моста Шерінга є те, що практично вся напруга випробувального трансформатора прикладена до об'єкту і зразкового конденсатора. Спад напруги на решті плечах моста Z_3 і Z_4 в декілька тисяч разів менший і не перевищує одного вольта. Тому, в межах точності вимірювань, яка нас цікавить, можна вважати, що при відповідності струму в діагоналі, струми у гілках Z_3 і Z_4 не залежать від величини цих елементів і визначаються, відповідно, величиною ємності об'єкта і зразкового конденсатора.

Процес вимірювання діелектричних втрат в мостовій схемі зручно прослідкувати на векторній діаграмі (див. рис. 11). Струм I_N , що не має втрат, зразкового конденсатора випереджує напругу на 90° . Струм I_x випереджує напругу на менший кут.

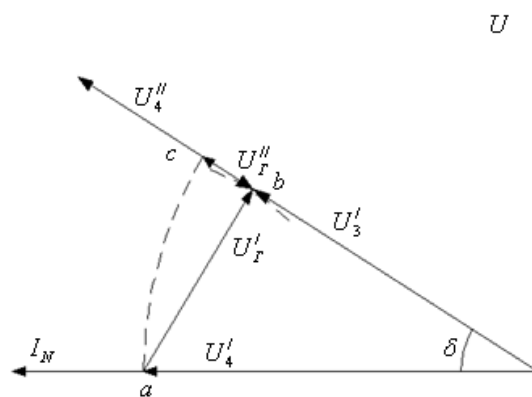
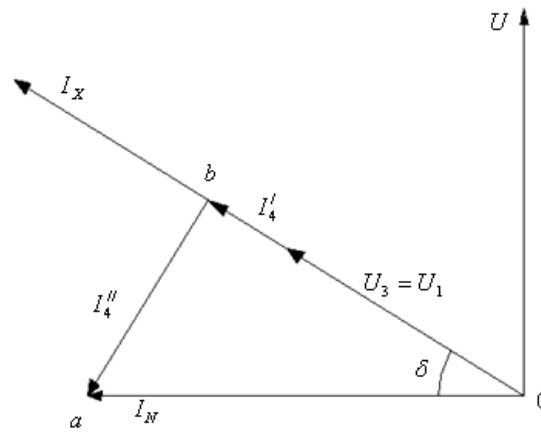


Рисунок 11 - Векторна діаграма струмів і напруг мостової схеми в процесі зрівноваження моста

Різниця фаз цих струмів – кут δ , який підлягає вимірюванню. Як відомо, процес вимірювання полягає у зрівноваженні моста, тобто у створенні рівноваги спадів напруг в плечах Z_3 і Z_4 . При цьому в будь-який момент часу різниця потенціалів між точками 3 і 4 (рис. 11) рівна нулю і струм через показчик рівноваги відсутній.

Тому

$$I_x \cdot Z_3 = I_N \cdot Z_4. \quad (10)$$

Розгляд процесу врівноваження моста доцільно провести в припущенні, що опір показчика рівноваги настільки більший опорів плеч Z_3 і Z_4 , що струмом в діагоналі при не врівноваженні моста можна знехтувати. Це може бути, наприклад, при електронному нуль-індикаторі. Тоді можна вважати, що різниця потенціалів між точками 3 і 4 моста визначається лише співвідношенням його плечей.

На початку урівноваження ємність $C_4=0$ і напруга на плечі $Z_4(U_4')$ співпадає по фазі із струмом I_N (рис. 11, точка a). Змінюючи величину R_3 і, тим самим, змінюючи по модулю напругу U_3 , добиваються мінімальної величини

напруги в діагоналі: $U'_r = U'_4 - U'_3$ (точка ϵ). Очевидно, що це буде у разі, коли вектор U'_r стане перпендикулярним вектору U'_3 . На другому етапі урівноваження, змінюючи величину C_4 , змінюють фазу напруги U_4 до отримання мінімальної величини напруги в діагоналі. При цьому кінець вектора U_4 переміщатиметься по кривій ac , практично (при малих кутах δ) колом, оскільки невеликі значення C_4 , змінюючи фазу напруги U_4 , дуже мало впливають на модуль Z_4 , а, отже, і на величину U_4 .

Другий етап урівноваження закінчиться при співпаданні фаз напруг U''_4 і U'_3 . При цьому напруга в діагоналі $U_r = U''_r$. Залишається, знову змінюючи R_3 , звести до нуля і цю напругу. Проте, оскільки попередні операції урівноваження проводилися при малій чутливості показчика рівноваги, первинне балансування виявляється неточним. Більш точне балансування виконується декількома аналогічними циклами при все зростаючій чутливості показчика рівноваги. У разі, коли опір показчика рівноваги невеликий (наприклад, у вібраційного гальванометра), струм, що проходить в діагоналі, незначно спотворить розподіл потенціалів в точках 3 і 4 моста і повне урівноваження також потребує декількох циклів, послідовно наближуючи міст до рівноваги.

З векторної діаграми (рис. 11) зрівноваженого моста виходить, що шуканий кут δ рівний зсуву фаз між струмом I_N і напругою U_4 . Оскільки в діагоналі моста при рівновазі струму немає, то весь струм зразкового конденсатора протікає через паралельно з'єднанні опір R_4 і ємність C_4 . Струм I'_4 співпадає по фазі з напругою U_4 , струм I''_4 випереджує його на 90° . З трикутника aov маємо:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I''_4}{I'_4}; \quad I''_4 = \omega \cdot C_4 \cdot U_4; \quad I'_4 = \frac{U_4}{R_4}, \quad (11)$$

звідки

$$\operatorname{tg} \delta = \omega \cdot C_4 \cdot R_4. \quad (12)$$

Для простоти розрахунків опір R_4 береться рівним $\frac{10^n}{\pi}$, де n – ціле число.

Тоді, при промисловій частоті ($\omega = 2\pi \cdot f = 100 \cdot \pi$) матимемо:

$$\operatorname{tg} \delta = 100 \cdot \pi \cdot C_4 \cdot \frac{10^n}{\pi} = C_4 \cdot 10^{n+2}. \quad (13)$$

Якщо C_4 відрахувати в мікрофарадах, то величина виміряного $\operatorname{tg} \delta$ легко визначається згідно таблиці 1.

Таблиця 1 - Таблиця розрахунку $\operatorname{tg} \delta$

$R_4, \text{ Ом}$		$\frac{100}{\pi}$	$\frac{1000}{\pi}$	$\frac{10000}{\pi}$
Значення $\operatorname{tg} \delta$	абсолютне	$0,01 \cdot C_4$	$0,1 \cdot C_4$	C_4
	%	C_4	$10 \cdot C_4$	$100 \cdot C_4$

Як правило, шкала магазину ємностей C_4 градується безпосередньо в величинах $tg\delta$.

Одночасно з вимірюванням $tg\delta$ можна визначити ємність C_X об'єктів. Із рівнянь для схеми моста випливає:

$$U_3 = I_X \cdot R_3; \quad (14)$$

$$U_4 = I_N \cdot Z_4 = I_N \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_4}\right)^2 + (\omega \cdot C_4)^2}} = I_N \cdot \frac{R_4}{\sqrt{1 + (\omega \cdot R_4 \cdot C_4)^2}}.$$

Враховуючи (13), отримуємо:

$$U_4 = I_N \cdot \frac{R_4}{\sqrt{1 + tg^2\delta}}. \quad (15)$$

Струм через зразковий конденсатор має тільки реактивну складову $I_N = \omega \cdot C_N \cdot U$. Струм I_X містить реактивну $I_X = \omega \cdot C_X \cdot U$ і активну складові $I_a = I_C \cdot tg\delta = \omega \cdot C_X \cdot U \cdot tg\delta$. Модуль струму:

$$I_X = \sqrt{I_C^2 + I_a^2} = \omega \cdot C_X \cdot U \cdot \sqrt{1 + tg^2\delta}. \quad (16)$$

Для зрівноваженого моста напруги U_3 і U_4 рівні, а, підставляючи значення струмів I_N і I_X , отримаємо:

$$\omega \cdot C_X \cdot U \cdot R_3 \cdot \sqrt{1 + tg^2\delta} = \omega \cdot C_N \cdot U \cdot \frac{R_4}{\sqrt{1 + tg^2\delta}},$$

звідки

$$C_X = C_N \cdot \frac{R_4}{R_3} \cdot \frac{1}{1 + tg^2\delta}. \quad (17)$$

В діапазоні величин $tg\delta$, який нас цікавить, з похибкою, що не перевищує 2% величини, що вимірюється, можемо знехтувати величиною $tg^2\delta$ в порівнянні з одиницею. Тому в практиці використовується спрощений вираз для розрахунку ємності об'єкту:

$$C_X = C_N \cdot \frac{R_4}{R_3}. \quad (18)$$

Як правило, в мостах, крім декадного магазину опору R_3 , є невеликий плавно змінний опір - реохорд, під'єднаний послідовно до R_3 . В цьому випадку при підрахунку величини ємності треба враховувати діючу частину реохорда ρ :

$$C_X = C_N \cdot \frac{R_4}{R_3 + \rho}. \quad (19)$$

Для розширення меж вимірювання моста в плече R_3 вводяться шунти.

6. Завдання до виконання лабораторної роботи

6.1 Ознайомитися зі схемою установки, розміщенням її елементів, ходом виконання роботи, правилами безпеки при роботі на установці. Провести

необхідні додаткові електромонтажні роботи.

6.2 Провести заміри $tg\delta$ для відрізка кабелю 10 кВ, паперово-бакелітового вводу 35 кВ при напругах 3, 5, 7, 9 кВ. Заміри виконати згідно переверненої схеми.

6.3 Провести заміри $tg\delta$ для трансформатора струму ТФН-35 при наявності електростатичних впливів (струм впливу встановити згідно завдання). Заміри виконати згідно переверненої схеми при напрузі 3 кВ.

6.4 Провести заміри $tg\delta$ для моделей сухої та зволоженої ізоляції з кабельного паперу при температурах 20, 30, 40, 50, 60 °С та напрузі 3 кВ. Отримані результати замірів занести в таблицю.

6.5 Привести всі органи управління установкою у вихідне положення; вимкнути установку; доповісти керівнику заняття про завершення лабораторної роботи.

7. Звіт

7.1 Подати назву лабораторної роботи, її мету та завдання.

7.2 Накреслити функціональну схему установки та принципову електричну схему її вимірювальної ланки.

7.3 Описати основні положення, покладені у принцип заміру досліджуваних фізичних величин.

7.4 Побудувати залежності від напруги $tg\delta=f(U)$ для кабелю та паперово-бакелітового вводу. Підібрати емпіричні формули для отриманих залежностей.

7.5 Побудувати залежності від вмісту вологи $tg\delta=f(\Theta)$ для зволоженої та висушеної моделей ізоляції. Підібрати емпіричні формули для отриманих залежностей.

7.6 Виходячи з абсолютних значень $tg\delta$ для трансформатора ТФН-35 та паперово-бакелітового вводу дати заключення про можливість їх експлуатації.

7.7 Підвести підсумок виконання лабораторної роботи у висновку.

Запитання для самоперевірки

1. Що таке кут діелектричних втрат?
2. Від яких факторів залежить тангенс кута діелектричних втрат?
3. В чому полягають недоліки $tg\delta$ як критерію стану ізоляції?
4. Чим відрізняються нормальна схема заміру $tg\delta$ від переверненої?
5. Які вимоги до конструкції моста змінного струму пов'язані із замірами згідно переверненої схеми?
 6. Про що свідчить ріст $tg\delta$ при підвищенні випробувальної напруги?
 7. Який вигляд має векторна діаграма рівноваги моста при врахуванні зовнішніх електростатичних впливів?
 8. Поясніть принцип дії дослідної установки та основні положення, покладені у хід виконання лабораторної роботи з визначення досліджуваних фізичних величин.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

1. Тема роботи

«Дослідження генератора імпульсних напруг».

2. Мета

Закріплення знань основних схем генераторів імпульсних напруг (ГІН); освоєння схеми автоматичного управління ГІН й синхронізації його роботи з електронним осцилографом; напрацювання навичок осцилографування одиночних імпульсів високої напруги мікросекундного діапазону; аналіз схеми розрядної ланки генератора.

3. Стислі теоретичні відомості

Генератор імпульсних напруг (ГІН) - основна випробувальна установка високовольтної лабораторії. За допомогою ГІН відтворюють атмосферні, рідше - комутаційні перенапруги та досліджують їх дію на ізоляцію електрообладнання. Розгляд основних схем ГІН полягає в дослідженні ГІН, змонтованих згідно класичної схеми Аркад'єва–Маркса, ГІН з розподіленим вздовж ступенів розрядним опором; експериментальному визначенні індуктивності розрядного контуру; дослідженні впливу фронтної індуктивності навантаження на форму імпульсу напруги ГІН.

Випробування ізоляції устаткування стандартними «грозовими» імпульсами, що мають тривалість фронту $(1,2 \pm 0,4) \text{ мкс}$ і тривалість до напівспаду імпульсу $(50 \pm 10) \text{ мкс}$ проводять за допомогою генераторів імпульсної напруги (ГІН) згідно ГОСТ 1516.2–97 «Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции» (діючий, перевид. 11. 2003). Схеми ГІН достатньо різноманітні, проте випробування ізоляції, зазвичай, проводять генераторами з ємнісними накопичувачами, що володіють вельми невеликими паразитними індуктивностями елементів.

Стандартний грозовий імпульс в ємнісному ГІН отримують шляхом розряду високовольтного конденсатора на резистор, а порівняно пологий фронт в $1,2 \text{ мкс}$ формують за рахунок заряджання допоміжного конденсатора через додатковий резистор. Таким чином, мінімальна кількість елементів ГІН без урахування зарядного пристрою і комутатора складає чотири (рис. 1); такі схеми застосовують при напрузі менше 100 кВ .

Схема містить основний заздалегідь заряджений конденсатор C_1 , основний розрядний резистор R_1 і елементи формування фронту C_2 і R_2 . Для формування стандартного грозового імпульсу потрібно, щоб постійна часу розряду основного

конденсатора $\tau_1 = C_1 \cdot R_1$ була багато більшою постійної часу заряджання конденсатора фронту. Тому можна вважати, що в початкові моменти часу первинна напруга U_0 на конденсаторі C_1 різко зменшується через те, що паралельно конденсатору C_1 під'єднується конденсатор C_2 , так що початкова напруга процесу розряду виявляється дещо меншою (тут $q = C_1 \cdot U_0$ - початковий заряд конденсатора C_1). Наближено можна вважати, що заряджання конденсатора C_2 відбувається від джерела постійної напруги величиною U'_0 :

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

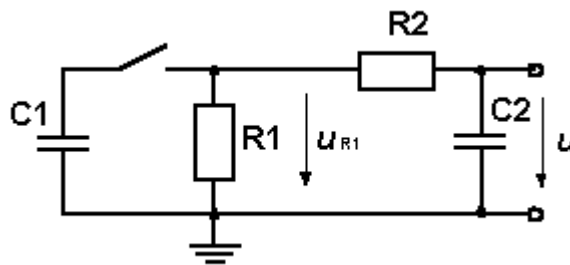


Рисунок 1 - Схема одноступеневого ГН

У цій формулі одиниця в дужках відповідає незмінній напрузі джерела постійної напруги. Оскільки в схемі ГН напруга достатньо поволі в порівнянні з фронтом зменшується з часом через розряд конденсатора на резистор R_1 , то цю одиницю слід замінити експонентою, що відображає простий процес розряду конденсатора на резистор:

$$u = U_0 \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot \left[\exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right]. \quad (2)$$

Таким чином, форма імпульсу ГН відображається різницею двох експонент, з яких перша відображає спад імпульсу за рахунок розряду основного конденсатора ГН на розрядний резистор, а друга - фронт імпульсу, що утворюється заряджанням фронтового конденсатора (див. рис. 2).

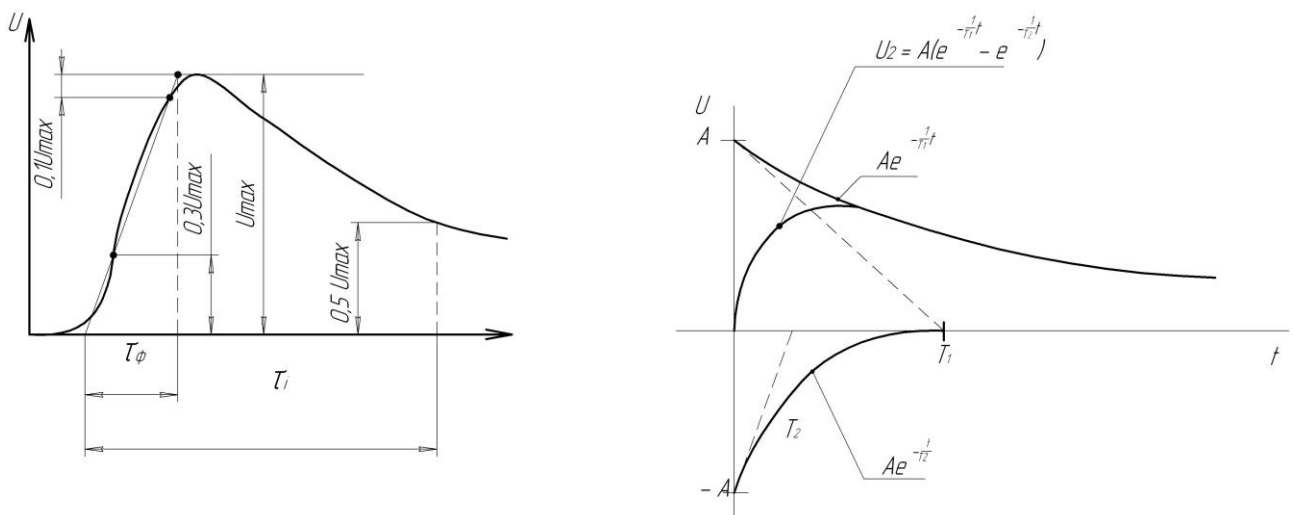


Рисунок 2 - Схема формування імпульсу ГН

Вираз $\eta = \frac{C_1}{C_1 + C_2}$, що показує ступінь використання початкової напруги

ГН, називається коефіцієнтом використання ГН.

З конструктивних міркувань фронтний резистор R_2 розташовують перед основним резистором R_1 (див. рис. 3).

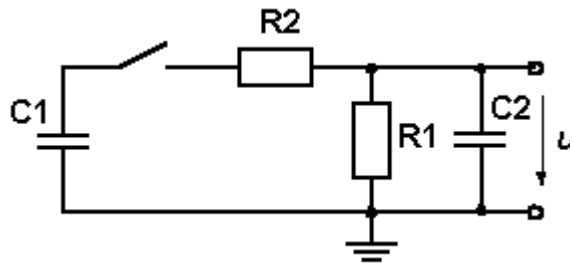


Рисунок 3 - Варіант схеми одноступеневого ГН

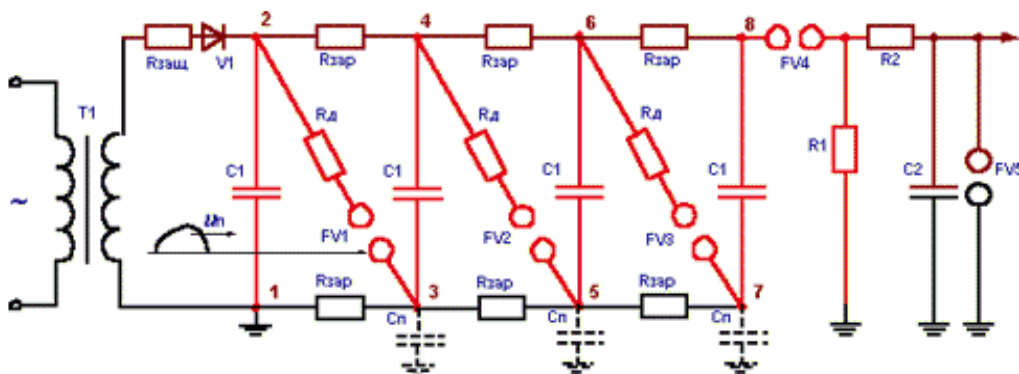
В цьому випадку напруга на виході ГН зменшується ще й за рахунок дії ділянки R_1-R_2 , так що коефіцієнт використання виявляється меншим на

коефіцієнт ділення цього ділянки $\eta = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$.

Схему ГН згідно рис. 1 або рис. 3 ще називають *одноступеневою*. Використання подібної схеми при напрузі більше 250-300 кВ стає неприйнятним внаслідок великих витрат на випрямляч і великих розмірів елементів.

Отримання імпульсів високої напруги з використанням порівняно низьковольтних зарядних пристроїв і конденсаторів можливе при використанні *багатоступневих* (каскадних) схем ГН. У багатоступеневій схемі декілька конденсаторів заряджають від зарядного пристрою паралельно, а при розряді вони перемикаються в послідовне з'єднання із складанням напруги на них. Перемикання, зазвичай, проводиться за допомогою іскрових проміжків.

На рис. 4 показана схема *чотириступеневого* ГН, який має зарядний пристрій на трансформаторі TV_1 , захисному обмежувальному опорі $R_{зах}$ і випрямлячі VD_1 , а також *чотири* основні конденсатори C_1 , кульові розрядники FV_1-FV_5 , демпферні резистори R_d і елементи формування фронту імпульсу R_2-C_2 .



а)

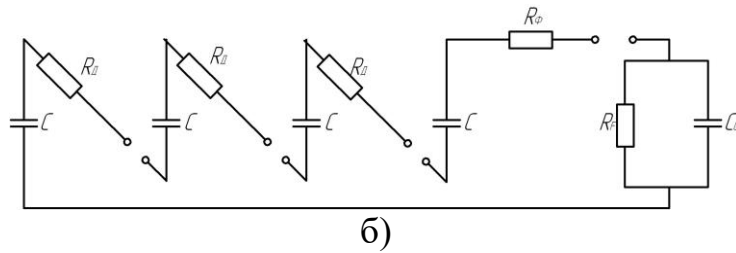


Рисунок 4 - Схема чотириступеневого ГІН (а)
та схема його розрядної ланки (б)

Відстані між кулями проміжків $FV1-FV4$ підібрані так, що їх пробивна напруга дещо більша зарядної напруги. Символами C_n позначені паразитні ємності устаткування, що грають істотну роль в роботі генератора.

Конденсатори C_1 ГІН заряджають від високовольтного випрямляча через зарядні резистори $R_{зар}$ паралельно до однакової напруги U_0 . Після цього на проміжок $FV1$ подається додатковий *запалювальний* імпульс напруги, так що цей проміжок пробивається. Потенціал точки 3 практично миттєво стає рівним U_0 , оскільки величина опору резистора R_d мала і мала постійна часу кола R_d-C_n . Потенціал точки 4 по відношенню до землі при цьому рівний сумі потенціалу точки 3 і напруги U_0 , а потенціал точки 5 залишається нульовим, оскільки паразитна ємність C_n не встигає заряджатися через порівняно високоомний резистор $R_{зар}$. Напруга на проміжку $FV2$ виявляється рівною $2U_0$ і проміжок $FV2$ пробивається, що приводить в перший момент часу до появи напруги $3U_0$ на проміжку $FV3$. Аналогічно пробивається і проміжок $FV4$, так що всі чотири конденсатори виявляються сполученими послідовно через іскрові проміжки і резистори R_d . Резистор R_d використовується для демпферування коливань в контурі $C_1-FV1-C_n$, в якому внаслідок наявності *індуктивностей проводів* можуть виникнути затухаючі коливання з великою амплітудою.

На рис. 4 червоним кольором (продубльовано на рис. 4, б)) показаний контур розряду конденсаторів, що утворюється при формуванні імпульсу. Напруга $4U_0$ (або $n \cdot U_0$ при n конденсаторах) називається *сумарною зарядною напругою* ГІН; іншою важливою характеристикою ГІН є *найбільше* значення *енергії*, що запасається генератором $\frac{n \cdot C \cdot U_{ном}^2}{2}$. При зміні зарядної напруги потрібне переналаштування іскрових проміжків.

Як пусковий проміжок $FV1$, зазвичай, використовується триелектродний розрядник (тригатрон). На рис. 5 представлений тригатрон у розрізі.

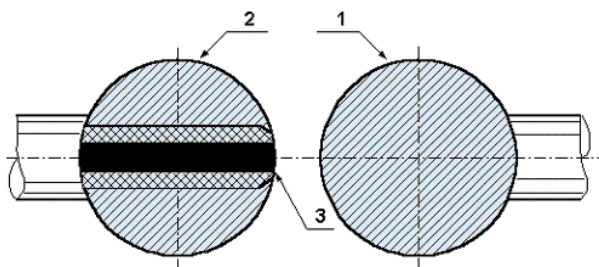


Рисунок 5 - Будова триелектродного розрядника (тригатрона)

При запалювальному імпульсі напруги між електродами 2 і 3 проміжок між ними пробивається, створюючи область іонізації в основному розрядному проміжку, внаслідок чого пробивається і основний проміжок між електродами 1 і 2.

Випробування ізоляції проводяться як повними, так і зрізаними імпульсами напруги. Іскровий проміжок *FV5* служить для отримання зрізаного імпульсу, для чого на нього через (2 ... 5) *мкс* після спрацювання генератора подається імпульс підпалу, внаслідок чого проміжок пробивається і «зрізає» імпульс ГІН.

Висновки

Стандартні «грозові» імпульси отримують на генераторах імпульсних напруг шляхом розряду зарядженого високовольтного конденсатора на резистор; фронт імпульсу формують шляхом заряджання додаткового конденсатора через додатковий фронтовий резистор. Для отримання імпульсів значних напруг використовують багатоступеневі схеми ГІН, в яких декілька конденсаторів заряджають від зарядного пристрою паралельно, а при розряді вони за допомогою іскрових проміжків перемикаються в послідовне з'єднання з складанням напруг на конденсаторах.

4. Самостійна робота

Самостійна робота виконується при підготовці до лабораторної роботи.

4.1. Отримати комплект технічної документації на прилади та установку, які використовуються при виконанні лабораторної роботи.

4.2. Ознайомитись з методичними вказівками до виконання лабораторної роботи, експлуатації приладів та установки в цілому.

4.3. В заготовці "Звіт з лабораторної роботи"

4.3.1 нарисувати схему електричних з'єднань приладів та установки в цілому, які використовуються при виконанні лабораторної роботи;

4.3.2 подати розшифрування всіх надписів та позначок на приладах та установці;

4.3.3 обміркувати і записати поетапний хід виконання лабораторної роботи;

4.3.4 обчислити похибки вимірювання фізичних величин, які визначаються приладами електричної схеми у ході виконання лабораторної роботи;

4.3.5 скласти необхідні таблиці для занесення числових значень

вимірюваних величин;

4.3.6 побудувати наближені графіки залежностей вимірюваних фізичних величин;

4.3.7 проаналізувати в комплексі хід роботи і записати нез'ясовані для себе запитання.

5. Опис дослідної установки

Лабораторна робота виконується на одно – чи чотириступеневому генераторах імпульсних напруг (див. рис. 6).

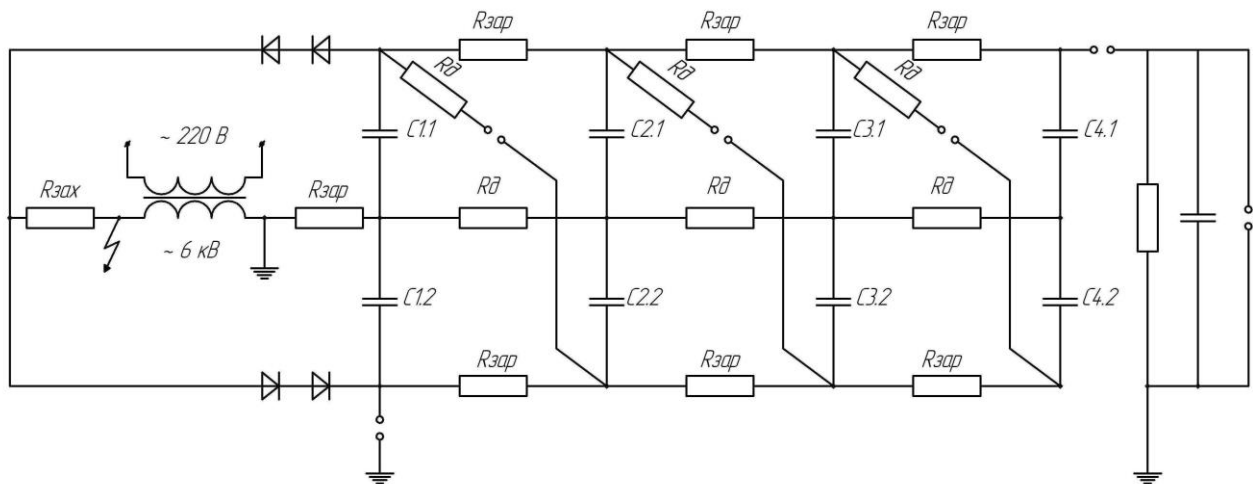


Рисунок 6 - Схема електрична принципова чотириступеневого ГІН

Необхідна **форма хвилі напруги** у таких ГІН досягається за допомогою спеціальних *формуючих елементів*, що вмикаються в розрядну ланку ГІН, таких як фронтний R_f та розрядний R_p опори. Також необхідно враховувати невідомі конструктивні параметри ГІН - еквівалентні індуктивність $L_{екв}$ та ємність $C_{екв}$, приведену до виходу ГІН (так звану - «паразитну»).

На рис. 7 подана схема заміщення розрядного контуру ГІН, яка містить всі його елементи.

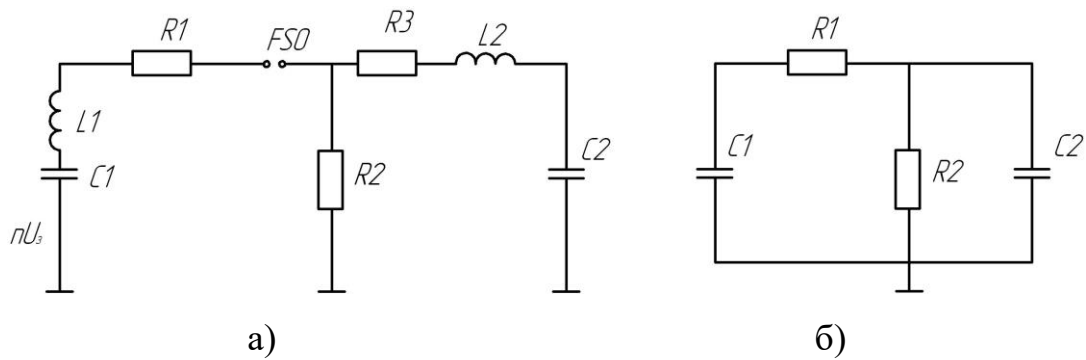


Рисунок 7 - Схема заміщення розрядного контуру ГІН

Еквівалентна ємність $C_1 = \frac{C}{n}$ всіх послідовно з'єднаних конденсаторів перебуває під напругою $n \cdot U_0$ і, зазвичай, має назву *ємності генератора в ударі*. Індуктивність L_1 представляє собою індуктивність окремих елементів ГІН і залежить від його конструктивного виконання. Опір $R_1 = \sum R_d$ - сума опорів у ланці розряду, які демпферують (сприяють затуханню) коливання. Опір R_2 відповідає розрядному опору, що вмикається на виході ГІН для регулювання довжини хвилі. Фронтний опір R_3 регулює тривалість фронту хвилі розряду. Індуктивність L_2 складається з індуктивності, що регулює форму імпульсу, та індуктивності досліджуваного об'єкту. В сумарну ємність C_2 входять ємність досліджуваного об'єкту, ємність на землю проводів за розрядним проміжком FSO , ємність вимірювальних пристроїв та розрядна ємність C_P , що регулює довжину фронту хвилі. Зарядні опори у схемі на рис. 7, а) не показані, так як вони не відіграють значної ролі у процесі розряду внаслідок свого великого номіналу (постійна часу $C \cdot R_{зар}$ набагато більша часу розряду ГІН, тобто струм розряду ємностей C через розрядні опори надзвичайно малий).

Схема заміщення може бути зведена до більш простої розрахункової схеми, поданої там же (див. рис. 7, б)), з елементами $C_1-R_1-R_2-C_2$. Таке спрощення допустиме, так як вплив індуктивностей L_1-L_2 має місце лише в початковий момент підйому напруги і при правильному виборі величини опору R_1 ними можна знехтувати. Опір формування фронту імпульсу R_ϕ можна прирівняти до нуля (згідно методики розрахунку вирази з врахуванням і без врахування R_ϕ аналогічні і описуються рівняннями другого порядку).

Із схеми заміщення, поданої на рис. 7, а), видно, що всі індуктивності та ємності генератора й приєднань об'єкта досліджень з'єднані послідовно, а тому вони можуть бути замінені еквівалентними елементами - індуктивністю $L_{екв}$ та ємністю $C_{екв}$:

$$C_{екв} = \frac{C}{4}; \quad L_{екв} = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_{пр}, \quad (3)$$

де C - ємність однієї ступені ГІН;

L_1, \dots, L_4 - індуктивності ступенів ГІН;

$L_{пр}$ - індуктивність приєднань досліджуваного об'єкта до ГІН.

Еквівалентну індуктивність ГІН можна визначити з досліду короткого замикання останнього розрядника на землю. В цьому випадку еквівалентна схема ГІН буде складатися з таких послідовно з'єднаних елементів: еквівалентної ємності $C_{екв}$; сумарного активного опору всіх під'єднувальних провідників R_{Σ} , включно з активними опорами іскрових каналів; еквівалентної індуктивності $L_{екв}$.

З осцилограми струму визначають період коливань струму к.з. $T_{к.з.}$ й згідно формули, яка пов'язує період коливань з параметрами коливального контуру $L_{екв}$ та $C_{екв}$, $T_{к.з.} = 2\pi \cdot \sqrt{L_{екв} \cdot C_{екв}}$ знаходимо:

$$L_{екв} = \frac{T_{к.з.}^2}{4\pi^2 \cdot C_{екв}}. \quad (4)$$

При відсутності формуючих елементів й роботі ГІН на холостому ходу схема заміщення розрядного контуру буде додатково містити елемент *приведеної конструкційної («паразитної») ємності* $C_{пр} \leq C_{екв}$, через який еквівалентна індуктивність замкнена на землю. Оскільки на холостому ходу напруга на виході ГІН має форму аперіодичних коливань, їх період визначається згідно виразу: $T_{х.х.} = 2\pi \cdot \sqrt{L_{екв} \cdot C_{пр}}$. Звідси знаходимо:

$$C_{пр} = \frac{T_{х.х.}^2}{4\pi^2 \cdot L_{екв}}. \quad (5)$$

Для усунення аперіодичних коливань в розрядний контур необхідно

увімкнуті *демпферний опір*, який вибирають згідно умови:

$$R_o \geq 2 \cdot \sqrt{\frac{L_{екв}}{C_{np}}} \quad (6)$$

Частота коливань при роботі ГІН на холостому ході через малі значення C_{np} й $L_{екв}$ така, що чверть періоду коливань, яка визначає фронт хвилі, значно менша від вимоги стандарту для хвилі «грозової» перенапруги. Для подовження тривалості фронту хвилі необхідний *фронтний опір* R_ϕ . Зазвичай суміщають функції демпферного R_o й фронтного R_ϕ опорів: $R_o = R_\phi = 2 \cdot \sqrt{\frac{L_{екв}}{C_{np}}}$. В цьому разі схема заміщення буде містити два послідовно сполучені елементи: $C_{екв}$ й R_ϕ , навантажені «паразитною» ємністю C_{np} , а форма хвилі буде П-подібною з необхідним фронтом.

Крім того, для отримання *фронту хвилі*, відповідного вимозі стандарту, на виході ГІН під'єднують т.з. фронтну ємність C_ϕ . Слід зважати на те, що повна фронтна ємність є сумою трьох ємностей: приведеної конструкційної ємності C_{np} , ємності досліджуваного об'єкта $C_{об}$ й додаткової ємності $C_{доо}$, яка додатково приєднується до ГІН, щоб забезпечити фронт хвилі:

$$C_\phi = C_{np} + C_{об} + C_{доо} \quad (7)$$

Тривалість фронту хвилі оцінюють з виразу:

$$t_\phi \cong 3,25 \cdot R_\phi \cdot C_\phi = 3,25 \cdot R_\phi \cdot (C_{np} + C_{об} + C_{доо}) = 1,2 \cdot 10^{-6} [c].$$

Для формування *тривалості хвилі*, яка відповідає стандарту, необхідно забезпечити спад напруги на 50% від максимуму за 50 мкс. Для цього на виході ГІН під'єднують розрядний опір R_p , значення якого визначають з виразу:

$$t_{хв} \cong 0,7 \cdot C_{екв} \cdot R_p = 50 \cdot 10^{-6} [c].$$

$$\text{Звідси } R_p = \frac{50 \cdot 10^{-6}}{0,7 \cdot C_{екв}}.$$

В загальному випадку розрядний опір представляє собою паралельне з'єднання трьох опорів: опору дільника напруги $R_{дил}$, опору навантаження R_n й

додаткового опору $R_{\text{доо}}$ і визначається з виразу
$$R_p = \frac{R_n \cdot R_\phi \cdot R_{\text{доо}}}{R_n \cdot R_\phi + R_\phi \cdot R_{\text{доо}} + R_n \cdot R_{\text{доо}}}$$

Схема заміщення буде містити два послідовно сполучені елементи: $C_{\text{екв}}$ й R_ϕ , навантажені паралельно з'єднаними розрядним опором R_p й фронтовою ємністю C_ϕ , а форма хвилі буде відповідати «грозовій».

Переважаю $C_{\text{об}} \ll C_{\text{доо}} \gg C_{\text{пр}}$, $R_n \gg R_\phi$ й $R_n \gg R_{\text{доо}}$, а тому після підбору параметрів $C_{\text{доо}}$ й $R_{\text{доо}}$ під'єднання об'єкта випробувань практично не впливає на форму хвилі на виході ГІН.

Основу *чотириступеневого ГІН* (див. рис. 6) становлять конденсатори C типу КВИ-3-3300 пФ-10 кВ (4 ступені по 8 конденсаторів у ступені), які заряджаються за схемою двопівперіодного випрямлення за допомогою послідовно увімкнених у кожній з ланок двох випрямлячів типу КЦ-201Е (15 кВ) й ланки захисних резисторів $R_{\text{зах}}$ величиною 17 кОм (КЭВ-2-510 кОм (20 кВ), 30 шт. паралельно). Висока напруга від трансформатора типу НТМК-6-48 (ном. 6 кВ) на схему подається одножильним високовольтним кабелем типу КОВГ-10 (10 кВ). Зарядні опори – безіндукційні типу ТВО-2-430 Ом (6 штук).

Іскрові проміжки (розрядники) представляють собою чотири попарні кулеподібні електроди, відстані між якими можна регулювати.

Як фронтові резистори R_ϕ використовується збірка (5x5) паралельно-послідовно з'єднаних резисторів типу ТВО-2-20 Ом (75 штук). Фронтний конденсатор C_ϕ виконаний у вигляді двох регульованих пластин, розміщених у діелектричному корпусі і залитих трансформаторною оливою.

Послідовно з фронтовим опором ГІН встановлений кульовий розрядник, заземлений електрод якого дає змогу регулювати відстань між ними. При зведенні електродів кульового розрядника до дотику здійснюється режим короткого замикання ГІН; при максимальному розведенні електродів - холостого ходу; при проміжному положенні електродів - отримують зрізаний імпульс.

Як розрядний опір R_p використовують дві збірки з послідовно з'єднаних резисторів типу ТВО-2-1 кОм (20 штук) й ТВО-2-51 Ом (20 штук).

Вимірювання хвилі напруги на виході ГІН здійснюється активно–реактивним подільником напруги, виконаним на базі послідовно–паралельно з'єднаних конденсаторів типу К15-20 Н50в 220 пФ-2,0кВ й резисторів типу ТВО–2–1 кОм у високовольтній ланці та паралельно з'єднаних резисторів типу ТВО–2–51Ом у низьковольтній ланці.

Струм в розряді реєструється за допомогою шунта, встановленого послідовно в розрядному контурі у першій ступені. Шунт з еквівалентним опором $5,0 \times 10^{-3} \text{ Ом}$ виготовлений з паралельно з'єднаних відрізків *Ni-Cr*–дроту.

Для реєстрації сигналу з дільника й шунта використовується осцилограф типу СЕА С 8 «Electronics».

ГІН може працювати у двох режимах: в автогенераторному й керованому. Для керування розрядом ГІН на першій ступені передбачений триелектродний розрядник: між двома кулеподібними електродами вводиться третій «підпалювальний» електрод, що зумовлює електричний пробій першого іскрового проміжку.

Напруга заряду від блока живлення може регулюватися в межах 6 ... 10 кВ, що при чотиріступеневій двопівперіодній схемі заряджання конденсаторів дозволяє на виході ГІН отримати максимальний імпульс 40 ... 60 кВ.

Весь ГІН розташований в кутнико–сітковому корпусі для електромагнітної сумісності з іншими засобами вимірювання, а також безпечного проведення лабораторних досліджень.

6 Завдання до виконання лабораторної роботи

6.1 Ознайомитися зі схемою установки, розміщенням її елементів, ходом виконання роботи, правилами безпеки при роботі на установці. Провести необхідні додаткові електромонтажні роботи.

6.2 Дотримуючись правил безпеки проведення робіт на установці з ГІН, встановити розрядний, фронтний та зарядний опори згідно розрахункових значень. Скласти схему ГІН згідно поданої принципової схеми. В якості навантаження використати ємнісно–омічний подільник напруги.

Покинути випробувальне поле; зняти переносний заземлювач з

високовольтного електрода.

6.3 Налаштувати розрядник першого ступеня таким чином, щоб при подаванні зарядної напруги 6 ... 10 кВ відбувалось стабільне спрацювання всіх іскрових проміжків ГІН. При цьому, після кожної спроби подавання на схему зарядної напруги відмикати ГІН від мережі живлення й **розряджати його конденсатори.**

6.4 **Встановити переносний заземлювач на високовольтний електрод.** Зібрати схему *короткого замикання* ГІН. **Покинути випробувальне поле; зняти переносний заземлювач з високовольтного електрода.** Подати на зарядне коло високовольтну напругу. Зафіксувати осцилограму струму й визначити період коливань $T_{к.з.}$. Відімкнути ГІН від мережі живлення й **розрядити його конденсатори.**

6.5 **Встановити переносний заземлювач на високовольтний електрод.** Зібрати схему *холостого ходу* ГІН. **Покинути випробувальне поле; зняти переносний заземлювач з високовольтного електрода.** Подати на зарядне коло високовольтну напругу. Зафіксувати осцилограму напруги й визначити період коливань $T_{х.х.}$. Відімкнути ГІН від мережі живлення й **розрядити його конденсатори.**

6.6 **Встановити переносний заземлювач на високовольтний електрод.** Зібрати схему з *фронтним резистором* R_{ϕ} ГІН. **Покинути випробувальне поле; зняти переносний заземлювач з високовольтного електрода.** Подати на зарядне коло високовольтну напругу. Зафіксувати осцилограму напруги з встановленим фронтним резистором. Відімкнути ГІН від мережі живлення й **розрядити його конденсатори.**

6.7 **Встановити переносний заземлювач на високовольтний електрод.** Зібрати схему з *фронтним резистором* R_{ϕ} й *фронтним конденсатором* C_{ϕ} ГІН. **Покинути випробувальне поле; зняти переносний заземлювач з високовольтного електрода.** Подати на зарядне коло високовольтну напругу. Зафіксувати осцилограму напруги з встановленими фронтним резистором й фронтним конденсатором. Відімкнути ГІН від мережі живлення й **розрядити**

його конденсатори.

6.8 Встановити переносний заземлювач на високовольтний електрод. Ввести в дію *кульовий розрядник* ГІН. **Покинути випробувальне поле; зняти переносний заземлювач з високовольтного електрода.** Подати на зарядне коло високовольтну напругу. Зафіксувати осцилограму *зрізаної хвилі* імпульсу. Відімкнути ГІН від мережі живлення й **розрядити його конденсатори.**

6.9 Встановити переносний заземлювач на високовольтний електрод. Від'єднати від схеми *розрядний опір* ($R_P = \infty$), не змінюючи величини демпферних та фронтового опорів ГІН. **Покинути випробувальне поле; зняти переносний заземлювач з високовольтного електрода.** Подати на зарядне коло високовольтну напругу. Зафіксувати осцилограму напруги з від'єднаним розрядним опором. Відімкнути ГІН від мережі живлення й **розрядити його конденсатори.**

6.10 Встановити переносний заземлювач на високовольтний електрод. Під'єднати до схеми *розрядний опір* R_P та *фронтovu індуктивність* L_ϕ ГІН. **Покинути випробувальне поле; зняти переносний заземлювач з високовольтного електрода.** Подати на зарядне коло високовольтну напругу. Зафіксувати осцилограму напруги з під'єднаним розрядним опором. Відімкнути ГІН від мережі живлення й **розрядити його конденсатори.**

6.11 Встановити переносний заземлювач на високовольтний електрод. Закоротити *демпферні та фронтовий* опори ГІН. **Покинути випробувальне поле; зняти переносний заземлювач з високовольтного електрода.** Подати на зарядне коло високовольтну напругу. Зафіксувати осцилограму напруги із закороченими демпферними та фронтовим опорами. Відімкнути ГІН від мережі живлення й **розрядити його конденсатори.**

7 Звіт

7.1. Подати назву лабораторної роботи, її мету та завдання.

7.2. Навести принципову електричну схему ГІН й розшифрувати позначення всіх елементів.

7.3. Описати основні положення, покладені у принцип заміру досліджуваних фізичних величин. Навести форми стандартних випробувальних хвиль.

7.4. Розрахувати основні елементи принципової схеми ГН згідно ввідних даних, отриманих від керівника лабораторної роботи.

7.5. Згідно отриманих періодів коливань схем короткого замикання $T_{к.з.}$ й холостого ходу $T_{х.х.}$ визначити еквівалентну індуктивність $L_{екв}$ та приведену конструкційну («паразитну») ємність $C_{пр}$. Навести та описати отримані імпульси напруги й струму, отримані в результаті виконання робіт згідно пп. 6.4, 6.5.

7.6 Розрахувати фронтовий $R_{ф}$ і розрядний $R_{р}$ опори, які забезпечують стандартну форму хвилі, у відповідності з експериментально отриманими величинами періодів затухань $T_{к.з.}$ й $T_{х.х.}$; обчислити фронтову $C_{ф}$ й приведену конструкційну $C_{пр}$ ємності, вважаючи відомими еквівалентну ємність $C_{екв}$ та демпферний опір $R_{д}$.

7.7. Привести осцилограму та переконатися у зростанні тривалості імпульсу й амплітуди в результаті виконання робіт згідно п. 6.9.

7.8. Пояснити причину зростання амплітуди та появи коливань на спаді імпульсу в результаті виконання робіт згідно п. 6.10.

7.9. Привести осцилограму й визначити період коливань на спаді імпульсу, а також сумарну індуктивність розрядного контуру в результаті виконання робіт згідно п. 6.11.

7.10. Проаналізувати отримані залежності параметрів високовольтних імпульсів для схем ГН різноманітної конфігурації. Порівняти дослідні та розрахункові дані.

7.11. Підвести підсумок виконання лабораторної роботи у висновку.

Контрольні питання

1. Приведіть спрощену схему генератора стандартних грозових імпульсів і поясніть принцип його дії.
2. Приведіть спрощені схеми зарядної та розрядної ланок генератора імпульсних напруг, поясніть принцип дії і форму отримуваних імпульсів.
3. Поясніть принцип роботи багатоступінчатого генератора імпульсних напруг.
4. Які види перенапруг можна отримати за допомогою ГІН?
5. Який вплив справляють параметри розрядної ланки ГІН на тривалість фронту й імпульсу напруги, а також коефіцієнт його використання?
6. Чому коефіцієнти використання зарядної ланки, форми імпульсу й схеми менші за одиницю; від чого залежать вказані коефіцієнти?
7. Яким чином змінюється полярність імпульсу напруги ГІН?
8. Як регулюється амплітуда імпульсу напруги ГІН?
9. Які наслідки ввімкнення в розрядну ланку ГІН фронтової індуктивності?
10. Як змінюється форма імпульсу після ввімкнення фронтової ємності?
11. Який вплив справляє на форму імпульсу індуктивність випробувального об'єкту?
12. Згідно яких признаков визначається, чи витримала внутрішня ізоляція трансформатора імпульсні випробування, чи ні?
13. Чому при імпульсних випробуваннях ізоляції обвитки ВН трансформатора інші обвитки закорочуються й заземляються?
14. Чому ізоляція трансформаторів, реакторів та обертальних електричних машин повинна випробовуватися повною й зрізаною імпульсними хвилями?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

1. Тема роботи

«Дослідження стаціонарних перенапруг в електричних системах з ізольованою та резонансно заземленою нейтраллю».

2. Мета

Дослідження стаціонарних перенапруг і струмів при однофазному замиканні на землю в електричних системах з ізольованою нейтраллю та з нейтраллю, заземленою через дугозагасну котушку (реактор); закріплення знань основних схем заміру ємнісних струмів та їх компенсації; напрацювання навичок настроювання електричних мереж номіналом (10–35) кВ для зменшення наслідків однофазного замикання на землю.

3. Стислі теоретичні відомості

3.1 Дугові перенапруження при однофазних замиканнях на землю

Переважає більшість замикань на землю супроводжується виникненням дуги. Заземлюючі дуги можуть бути поділені на два види. Це, по-перше, довгі дуги, які вільно горять на відкритому повітрі і виникають в результаті перекриття зовнішньої ізоляції, наприклад внаслідок грозових перенапружень. Другий вид — короткі закриті дуги всередині ізолюючого середовища, причиною виникнення яких є пробої внутрішньої ізоляції кабелів, машин, трансформаторів і т.д. Часто це можуть бути початкові стадії пошкодження, при яких ізоляція може відновити свою електричну міцність, якщо забезпечено швидке згасання дуги.

В малопротяжних мережах номіналом (6–35) кВ струм однофазного замикання на землю складає всього декілька ампер, тому наявність замикання на землю практично не позначається на умовах передачі енергії споживачам. Трикутник лінійних напруг залишається неспотвореним, а підвищення напруги непошкоджених фаз щодо землі до лінійного не є небезпечним для ізоляції, оскільки її рівень значно вищий. При малих струмах спостерігається швидке самозгасання дуги. Чинниками, які сприяють гасінню відкритої дуги, є її видовження під дією динамічних зусиль або потоків повітря. Гасіння закритих дуг зумовлено виникненням ударних тисків завдяки випаровуванню і розкладанню просочувальної маси і виділенню деіонізованих газів.

На підставі багаторічного досвіду експлуатації допускається робота мереж (3–35) кВ з ізольованою нейтраллю при ємнісних струмах, що не перевищують значення, наведені в табл. 1. Оскільки ємність на землю кожного провідника

складає $C_0 = (5000-6000) \text{ нФ/км}$, то питомий ємнісний струм замикання на землю, тобто струм на 1 км довжини лінії і 1 кВ номінальної напруги для повітряних ліній, в середньому дорівнює $I_{\text{пит}} = 3 \text{ мА/км}\cdot\text{кВ}$. Ємність на 1 км кабельної лінії залежить від номінальної напруги, конструкції і перетину кабелю, але в середньому може бути оцінена в 200000 нФ/км , тобто приблизно $I_{\text{пит}} = 100 \text{ мА/км}\cdot\text{кВ}$.

В табл. 1 дані значення струмів на 1 км довжини для мереж (3–35) кВ, а також сумарні довжини повітряних і кабельних ліній, при яких струм набуває цих значень.

Таблиця 1 - Значення струмів для мереж (3–35) кВ

Номінальна напруга, кВ	Допустимий ємнісний струм, А	$I_{\text{пит}}, \text{ А/км}\cdot\text{кВ}$, лінії		Довжина лінії, км	
		повітряної	кабельної	повітряної	кабельної
3-6*	30	0,018	0,6	1700	50
10	20	0,03	1,0	700	20
15-20 *	15	0,06	2,0	250	7,5
35	10	0,105	3,5	100	3,0

* Значення питомих струмів і довжин відноситься до більших значень номінальних напруг

Збільшення протяжності електричних систем приводить до збільшення ємнісного струму до десятків і сотень ампер, що утруднює умови деіонізації дуги і збільшує тривалість її горіння. Цей процес може бути нестійким, тобто остаточному згасанню дуги передують декілька “спроб гасіння” під час переходу струму через нульове значення з подальшим повторним запаленням дуги під впливом напруги, що відновлюється на дуговому проміжку. Така перемінна дуга приводить до розвитку коливань, що виникають при кожному обриві і запаленні, тобто до появи перенапружень, які мають багато спільного з перенапруженнями при відключенні не завантажених ліній.

3.2 Математична модель компенсації струму замикання на землю через дугозгасний реактор

Компенсація струму замикання на землю.

Одним з найпоширеніших засобів зменшення (компенсації) струму замикання на землю є увімкнення в нейтраль регульованого реактора (рис. 1), який називають також дугозгасною котушкою, котушкою Петерсена, настроєною індуктивністю.

При рівності часткових ємностей щодо землі для всіх фаз потенціал нейтралі в нормальному режимі дорівнює нулю і струм в котушці відсутній. При однофазному замиканні на землю на нейтралі з'являється напруга нульової послідовності, рівна U_ϕ , і в котушці виникає, струм

$$i_K = \frac{\dot{U}_\phi}{r_0 + j\omega L_0} = \dot{U}_\phi \left[\frac{r_0}{(\omega L_0)^2} - j \frac{1}{\omega L_0} \right] \quad (1)$$

В (1) L_0 - сумарна індуктивність ($L_0 = L_K + L/3$) і r_0 - активний опір

нульової послідовності, практично рівні індуктивності L_K і опору r_k самої котушки, причому $r_0 \ll \omega L_0$. Через місце замикання на землю проходять струм котушки і струм замикання на землю, який складається з струму ємності лінії і активної складової $3U_\phi \cdot g' \cdot l$, зумовленої витоками на ізоляторах і втратами на корону в повітряних лініях, діелектричними втратами в кабельних лініях. Загальний струм через місце замикання (залишковий струм I_0) дорівнює:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_3 + \dot{I}_K = U_\phi \left[3g'l + \frac{r_0}{(\omega L_0)^2} + j \left(3\omega C_0'l + \frac{1}{\omega L_0} \right) \right] = I_a + j(I_C - I_L); \quad (2)$$

$$I_0 = \sqrt{I_a^2 + (I_C - I_L)^2}. \quad (2a)$$

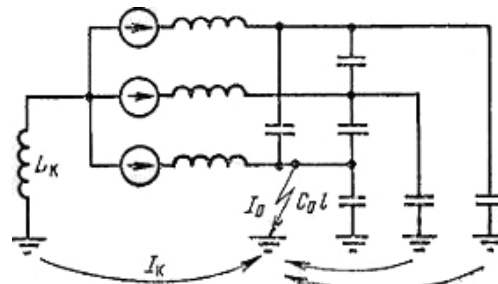


Рисунок 1 - Схема заміщення мережі з дугозагасною котушкою нейтралі

Обмеження струму через дуговий проміжок полегшує умови деіонізації дуги і підвищує ймовірність її швидкого гасіння.

3.3 Дослідження методик та способів перенапружень при дугових замиканнях фази на землю

Визначення величини струму замикання на землю

Розглянемо коло, що складається з трансформатора і приєднаної до нього лінії передачі, розімкненої на кінці (див. рис. 2).

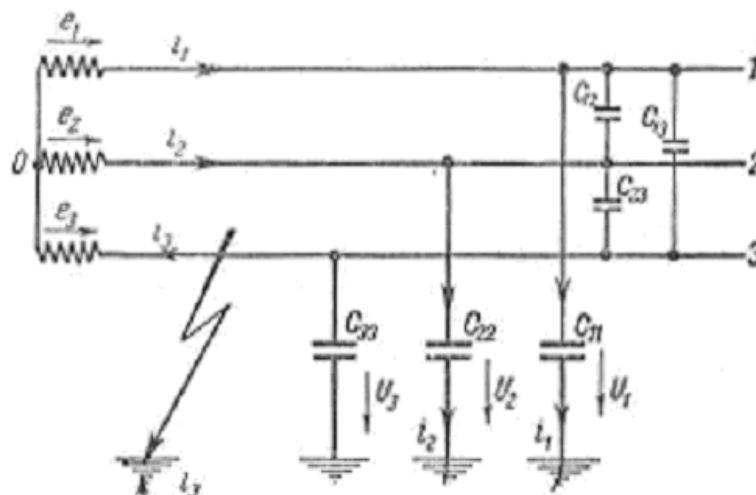


Рисунок 2 - Розподіл струмів в трифазній системі з ізольованою нейтраллю при замиканні однієї фази на землю

Як відомо, проводи лінії електропередач мають часткові ємності по

відношенню до землі C_{11} , C_{22} і C_{33} і ємності між фазами C_{12} , C_{13} і C_{23} . Припустимо, що система симетрична і транспонована; тоді потенціал кожної фази по відношенню до землі буде рівний фазній напрузі. В цьому випадку часткові ємності C_{11} , C_{22} і C_{33} по відношенню до землі, а також часткові ємності C_{12} , C_{13} і C_{23} рівні між собою. Припустимо тепер, що відбулося металеве замикання фази на землю. Тоді на пошкодженій фазі (рис 2) напруга дорівнюватиме нулю, а на двох інших вона зростає до лінійної.

Величина струму, що проходить через місце замикання на землю $I_3 = I_1 + I_2$; оскільки через симетрію схеми $I_1 = I_2 = I_\phi$; $U_\phi \cdot \omega C_{11} = U_\phi \cdot \omega C_{22}$, то $I_3 = 2I_\phi \cos 30^\circ = I_\phi \sqrt{3} = \sqrt{3} \cdot U_\phi \cdot \omega C_{11}$.

Виражаючи лінійну напругу U_ϕ через фазну, одержуємо:

$$I_3 = 3U_\phi \cdot \omega C_{11}. \quad (3)$$

Струм замикання на землю можна записати ще і у такому вигляді:

$$I_3 = 3 \cdot \omega C_0 \cdot l U_\phi, \quad (4)$$

де C_0 - ємність фази лінії на одиницю довжини по відношенню до землі;
 l — довжина лінії.

Середні значення струмів замикання на землю для повітряних ліній трифазного струму при 50 Гц наведені в табл. 2.

Таблиця 2 - Струми однофазного замикання на землю

Робоча лінійна напруга, кВ	Струм замикання на землю, А/км			
	Одноланцюгові лінії		Двохланцюгові лінії	
	без троса	з тросом	без троса	з тросом
6	0,013	—	0,077	—
10	0,0256	0,032	—	—
35	0,078	0,091	0,102	0,110
110	0,264	0,299	0,404	0,430
220	0,648	0,698	0,908	0,941

Збільшення часткової ємності щодо землі за рахунок обладнання підстанцій при різних номінальних напругах можна визначити за табл. 3.

Таблиця 3 - Збільшення ємності щодо землі

Номінальна напруга, кВ	10	35	70	100	150
Збільшення, %	16	13	11	9	8

Оскільки стікання струму ємності відбувається на кожній ділянці лінії, струм ємності в проводах неоднаковий вздовж лінії.

Дугозагасні апарати і схеми їх під'єднання.

Як вказувалось вище, для гасіння дуг однополюсного замикання на землю застосовують спеціальні дугозагасні апарати. Найпоширенішим апаратом є дугозагасна котушка. Дугозагасну котушку під'єднують між нейтральною точкою трансформатора і землею (див. рис. 3). На рис. 3 вказані ємнісні струми I_1 та I_2 , струм замикання на землю $I_{\text{зам}}$ і струм, що проходить по котушці I_L .

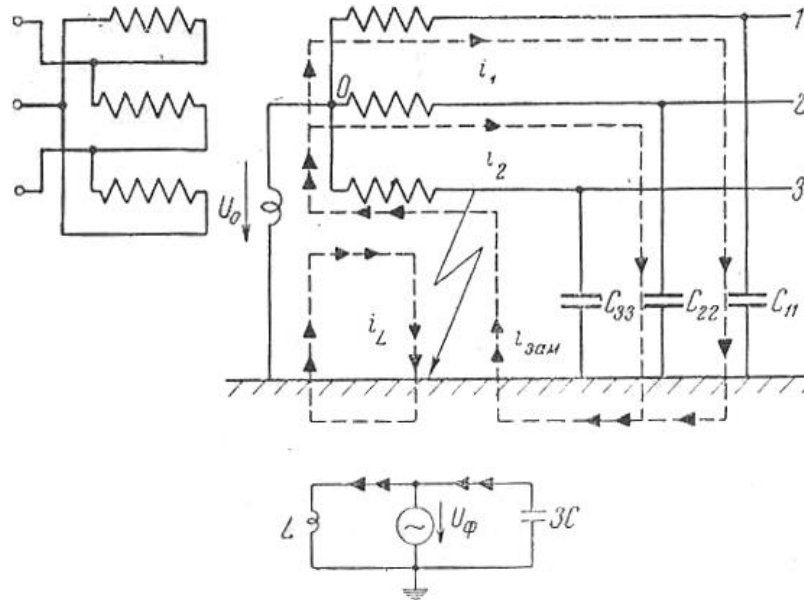


Рисунок 3 - Розподіл струмів у трифазній системі з дугозагасною котушкою в нейтралі при замиканні однієї фази на землю

З діаграми на рис. 4 видно, що струм замикання на землю визначається сумою двох струмів ємностей, зміщених по фазі на 60° . Для гасіння дуги необхідно, щоб струм в місці замикання на землю дорівнював нулю (ідеальний випадок). Цього можна досягти, якщо увімкнути в нейтраль джерела індуктивність такої величини, щоб струм, який протікає через неї, був рівний по величині і зсунутий по фазі на 180° щодо струму, який протікає в місці замикання на землю (рис. 4). Такою індуктивністю і є дугозагасна котушка.

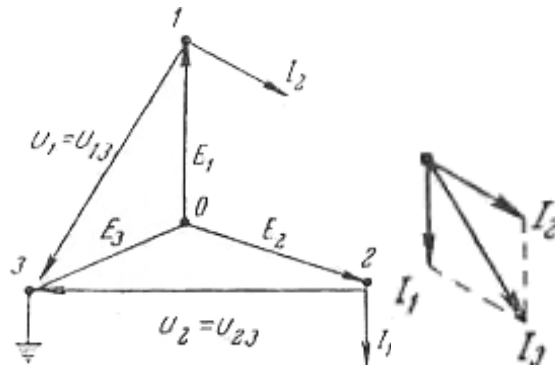


Рисунок 4 - Векторна діаграма напруг і струмів в трифазній системі з дугозагасною котушкою в нейтралі при замиканні однієї фази на землю

При замиканні проводу на землю на нейтралі з'являється напруга по відношенню до землі, що дорівнює фазній напрузі; тому струм, який протікає через котушку, рівний:

$$I_L = \frac{U_{0-3}}{\omega L} = \frac{U_\phi}{\omega L}. \quad (5)$$

Якщо матиме місце рівність $I_3 = I_L$, то $3 \cdot \omega C_{11} \cdot U_\phi = \frac{U_\phi}{\omega L}$. Звідси

$$\omega L = \frac{1}{3 \cdot \omega C_{11}}. \quad (6)$$

Останній вираз є умовою ідеального настроювання дугозагасної котушки. З нього може бути знайдена індуктивність L при відомій ємності C_{11} . Після того, як дуга згасне, утворюється коливальний контур з ємності системи і індуктивності дугозагасної котушки. З (6) видно, що коливальний процес в контурі протікатиме з частотою

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{3 \cdot LC_{11}}}. \quad (7)$$

При ідеальному настроюванні дугозагасної котушки ця частота дорівнює робочій. Коливальний процес в контурі затухатиме з коефіцієнтом згасання α , зумовленим активними втратами в колі.

Напруга на нейтралі U'_0 змінюватиметься за формулою

$$U'_0 = U_{\phi.\max} \cdot \sin \omega t \cdot e^{-\alpha t}, \quad (8)$$

де $U_{\phi.\max}$ - максимальне значення фазової напруги.

Напруга U' на справній фазі визначатиметься сумою напруг U'_0 й $U_0 = U_{\phi.\max} \cdot \sin \omega t$:

$$U' = U'_0 + U_0 = U_{\phi.\max} \cdot \sin \omega t \cdot (e^{-\alpha t} + 1). \quad (9)$$

Напруга U'' на несправній фазі визначатиметься різницею U'_0 і U_0 :

$$U'' = U'_0 - U_0 = U_{\phi.\max} \cdot \sin \omega t \cdot (e^{-\alpha t} - 1). \quad (10)$$

Амплітуда напруги U'' поволі наростає з нульового значення до фазового. Це явище (повільне відновлення напруги на пошкодженій фазі) сприяє гасінню дуги однополюсного замикання на землю. В реальних умовах струм в місці замикання на землю не буде рівний нулю; його величина зумовлена ступенем розладу, активними втратами в котушці, витокami з проводу на землю і вищими гармоніками.



Рисунок 5 - Векторна діаграма напруг і струмів при наявності залишкового струму в місці замикання на землю

Векторна діаграма струмів і напруг з врахуванням I_0 зображена на рис. 5. Заземлення нейтралі через дугозагасну котушку застосовується при струмах замикання на землю більше $3 A$ в мережах $35 kV$ і більше $30 A$ в мережах $(6 - 10) kV$. При менших струмах дуга замикання на землю, зазвичай, гасне мимовільно. Допустимий залишковий струм в дузі при наявності дугозагасної котушки повинен бути в межах $(4-10)\%$ повного струму замикання на землю для повітряних мереж і $(3-6)\%$ для кабельних. Ступінь розладу звичайно виражають через відношення струмів $\frac{I_3 - I_L}{I_3}$. Якщо відношення $\frac{I_3 - I_L}{I_3}$ більше нуля, то має

місце недокомпенсація. Коли це співвідношення менше нуля, тобто $I_3 < I_L$, має місце перекомпенсація. Нарешті, при $I_3 = I_L$ досягається повна компенсація.

Ввімкнення дугозагасної котушки робить вплив на напруги в робочому режимі в несиметричній системі, коли C_{11} , C_{23} і C_{33} не рівні між собою; напруга нейтралі трансформатора щодо землі не дорівнюватиме нулю в нормальному режимі.

При наявності дугозагасної котушки, ввімкненої в нейтраль джерела, і несиметричній системі ємностей напруга нейтралі

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_1 Y_1 + \dot{U}_2 Y_2 + \dot{U}_3 Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_0}, \quad (11)$$

де Y_0 – повна провідність котушки на землю.

Оскільки Y_0 є індуктивною провідністю, за наявності дугозагасної котушки напруга нейтралі збільшується. При ідеальному настроюванні (сума $Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_0$ близька до нуля) напруга U_0 досягне великої величини. Підвищення напруги нейтралі в несиметричній системі є недоліком дугозагасної котушки. При розладі котушки напруга нейтралі знижується. З цієї точки зору деякий розлад котушки бажаний. Для усунення асиметрії в системі на лініях повинна виконуватися транспозиція проводів.

Реактивна потужність дугозагасної котушки $Q_L = U_\phi \cdot I_L = U_\phi \cdot I_{зам} = 3 \cdot \omega C \cdot U_\phi^2$.

Конструкція і під'єднання дугозагасної котушки в мережу.

Дугозагасні котушки виконуються із сталевим осердям, який має повітряні щілини, для того, щоб забезпечити вольт–амперну характеристику, близьку до лінійної. Завдяки цьому зменшується вміст вищих гармонік в кривій струму через дуговий проміжок, присутність яких може утруднювати гасіння дуги.

Для регулювання настроювання котушки роблять з відгалуженнями, які дозволяють змінювати струм компенсації у співвідношенні 1 : 2 або 1 : 2,5.

Котушка поміщається в бак, заповнений маслом. Відгалуження для регулювання приєднуються до перемикача, розташованого всередині бака; привід перемикача виводиться назовні.

Рекомендовано застосовувати дугозагасні апарати при струмі ємності, що не перевищує значень, вказаних в табл. 1. Це визначає мінімальну потужність котушок, які випускаються підприємствами. Номінальна потужність котушки (реактивна) визначається згідно верхньої межі струму компенсації. В маркуванні котушок вказується: назва котушки - захисний реактор однофазний масляний (скорочено ЗРОМ), потужність $U_\phi \cdot I_{к макс}$ і номінальна напруга.

Сумарна потужність дугозагасних котушок, встановлених в мережі, повинна перевершувати на 25% зарядну потужність ліній, що враховує можливе розширення мережі, а також доцільність роботи з перекомпенсацією. Дугозагасні котушки бажано встановлювати на вузлових підстанціях. Для якнайкращого використання потужності котушки трансформатор, в нейтраль якого вона ввімкнена, повинен мати мінімальний опір нульової послідовності, що забезпечується наявністю обмотки, сполученої в трикутник.

В котушку може бути ввімкнена нейтраль спеціального трансформатора,

який не несе іншого навантаження, але значно частіше вона вмикається в нейтраль одного з працюючих трансформаторів, який при цьому одержує додаткове навантаження. Допускається ввімкнення котушки з потужністю, рівною 50% потужності трансформатора, за умови, що вона працюватиме з найбільшим струмом компенсації не більше 2 год.

При ввімкненні котушки в нейтраль триобмоткового трансформатора потужність її не повинна перевищувати потужності обмотки, з'єднаної в трикутник.

Загальний вигляд дугозагасної котушки з магнітопроводом показаний на рис. 6.

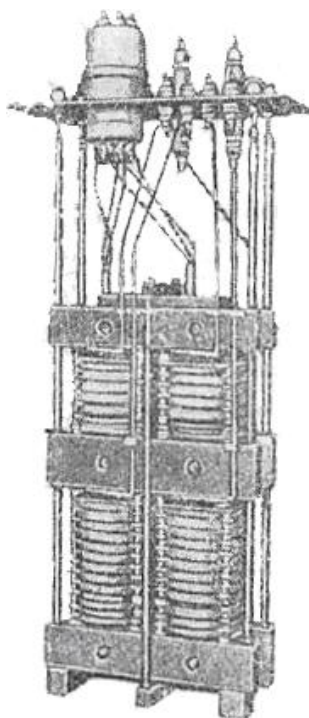


Рисунок 6 - Дугогасна котушка 15 кВ з широкими межами регулювання по струму (5 - 19) А

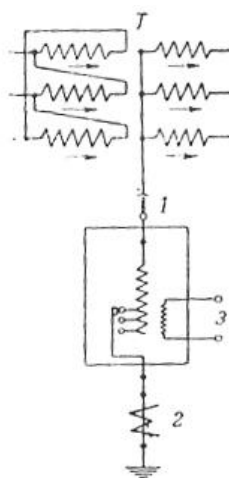


Рисунок 7 - Схема ввімкнення дугозагасної котушки

Схема ввімкнення дугозагасної котушки показана на рис. 7. Котушка до нульової точки трансформатора під'єднується через розділювач 1. Для

вимірювання струму через котушки ввімкнений трансформатор струму 2. Крім того, є додаткова обмотка 3, яка служить для того, щоб сигналізувати про замикання на землю.

Якщо нейтраль силового трансформатора неприступна, то в якості дугозагасного апарату застосовують дугозагасний трансформатор. Дугозагасний трансформатор вмикають безпосередньо на збірні шини установки.

Гасіння дуги трансформатором здійснюється так само, як і дугозагасною котушкою. Відмінність полягає тільки в конструктивному виконанні.

Магнітопровід дугозагасного трансформатора складається з чотирьох стержнів; на трьох з них є первинні і повторні обмотки. Первинні обмотки з'єднують зіркою і під'єднують до шин станції. Вторинні обмотки з'єднують в розімкнений трикутник, на затискачі якого вмикають регульовальний дросель (див. рис. 8).

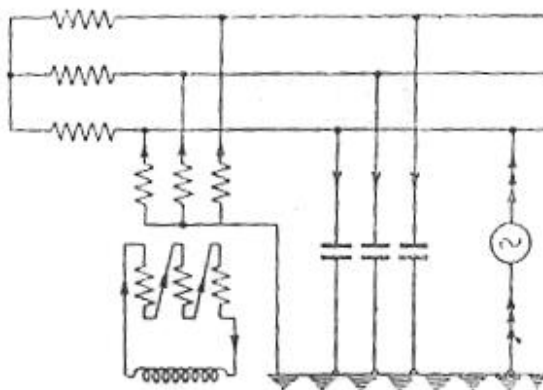


Рисунок 8 - Схема дугозагасного трансформатора

При замиканні на землю через фази первинної обмотки проходитимуть струми однакового напрямку (струми нульової послідовності), які створять магнітні потоки, що також направлені в одну сторону. Всі три потоки замикаються через четвертий стержень магнітопроводу. У вторинній обмотці індукватиметься э. р. с., яка утворює струм, що проходить через обмотки і регульовальний дросель. Цей струм є індуктивним, так само як і трансформований струм первинної обмотки. Струм в первинній обмотці дугозагасного трансформатора компенсуватиме ємнісний струм замикання на землю.

До переваг дугозагасного трансформатора потрібно віднести те, що він може бути ввімкнений незалежно від з'єднання обмоток силового трансформатора.

При нормальній роботі системи дугозагасний трансформатор працює, як звичайний трансформатор в режимі холостого ходу. Струм, який проходить в цьому випадку по первинній обмотці, є струмом холостого ходу трансформатора. У вторинній обмотці струм відсутній, оскільки сума э. р. с. в ній дорівнює нулю.

3.4 Теоретичні засади розроблення вузлів лабораторної установки для оцінювання перенапружень

В електричних системах найбільш поширеним пошкодженням є замикання фази на землю, наприклад через перекриття забрудненої ізоляції, наближення стороннього предмету, удару блискавки. Випадки металевого з'єднання фази із землею зустрічаються рідко. Звичайно, в місці ушкодження спалахує електрична дуга, яка при невеликих струмах замикання самозгасає, не чинячи значної дії на ізоляцію. В іншому випадку пошкоджену лінію необхідно відмикати, перериваючи електропостачання споживачів.

В системах (10–35) кВ нейтраль силових трансформаторів ізольована, що виключає утворення коротко замкненого ланцюга при замиканні фази на землю, а отже, виключається протікання великих однофазних струмів короткого замикання. В таких системах через місце замикання фази на землю протікають практично лише струми ємностей. В розгалужених системах ємності фаз великі і струми через них можуть забезпечувати тривале горіння дуги між фазою і землею. Така дуга перекидається на сусідні фази, викликаючи дво – або трифазні короткі замикання.

Для зменшення струму в дузі між нейтраллю трансформатора і землею вмикається індуктивна котушка, струм через яку знаходиться в протифазі із ємнісним струмом мережі.

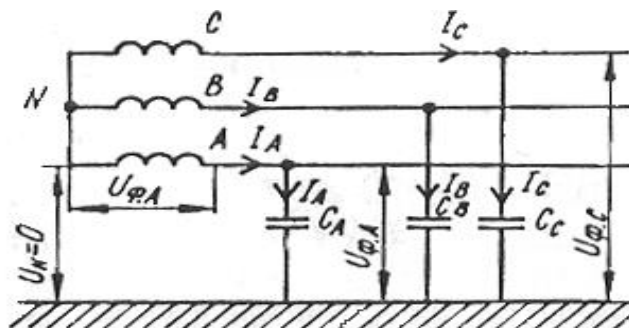
Оскільки обидва струми замикаються через дугу, то сумарний струм в ній зменшується і дуга самозагасає. Тому таку котушку називають дугозагасною.

Системи з ізольованою нейтраллю за рахунок транспозиції проводів, звичайно, володіють однаковими ємностями фаз на землю ($C_A = C_B = C_C = C$).

Якщо система фазних напруг $\dot{U}_{\phi A}, \dot{U}_{\phi B}, \dot{U}_{\phi C}$, симетрична, то через ємності C_A, C_B, C_C на землю протікають симетричні ємнісні струми $|\dot{I}_A| = |\dot{I}_B| = |\dot{I}_C|$ (рисунк 9, а), 10, а), відповідно), які випереджають фазові напруги на кут 90° (активною провідністю ізоляції нехтуємо); при цьому

$$\dot{I}_A = j \frac{\dot{U}_{\phi A}}{X_C} = j \cdot \omega C \cdot \dot{U}_{\phi A}, \quad (12)$$

а потенціал нейтральної точки N дорівнює нулю.



а)

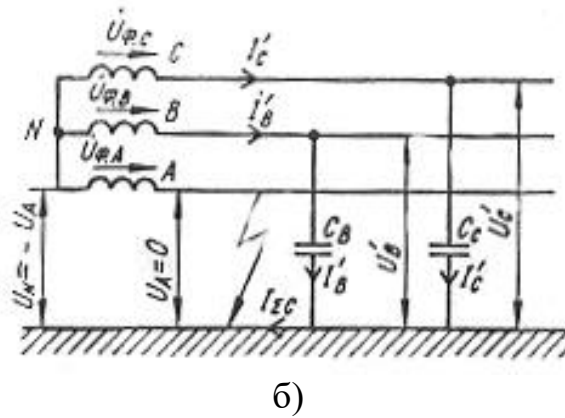


Рисунок 9 - Еквівалентні схеми електричної мережі з ізольованою нейтраллю в нормальному (а)) і аварійному (б)) режимах

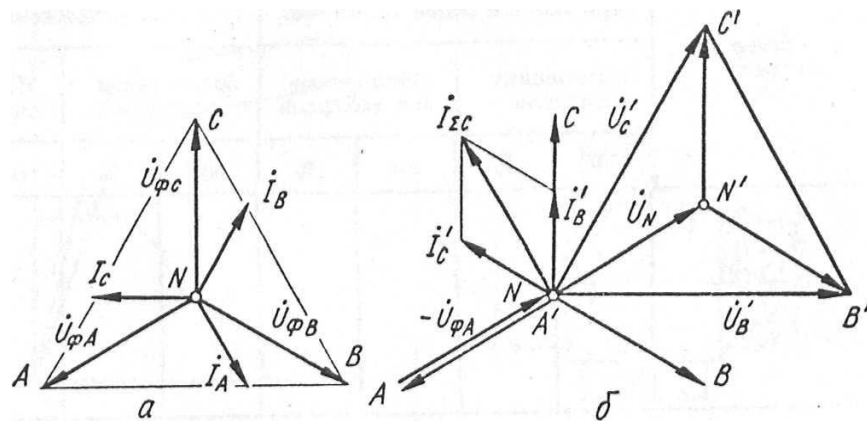


Рисунок 10 - Векторні діаграми напруг і струмів системи в нормальному (а)) і аварійному (б)) режимах

При з'єднанні однієї фази (наприклад, фази A) із землею (рис 9, б) в схемі не виникає короткого замикання і різниці потенціалів між точками A , B , C і нейтральною точкою N залишаються незмінними. Нейтраль (точка N) набуває напруги $\dot{U}_N = -\dot{U}_{\varphi A}$ а фазова напруга непошкоджених фаз зростає до значення лінійного:

$$\dot{U}'_B = \dot{U}_N + \dot{U}_{\varphi B} = -\dot{U}_{\varphi A} + \dot{U}_{\varphi B}; \quad (13-1)$$

$$\dot{U}'_C = \dot{U}_N + \dot{U}_{\varphi C} = -\dot{U}_{\varphi A} + \dot{U}_{\varphi C}. \quad (13-2)$$

Трикутник лінійних напруг, що визначений точками A' , B' , C' на векторній діаграмі (рис. 10, б)), дорівнює трикутнику лінійних напруг нормального режиму (рис. 10, а)). Оскільки споживачі одержують живлення від електричної системи на лінійній напрузі, розглянуте замикання не впливає на їх роботу, а отже, немає необхідності в негайному відключенні лінії.

Збільшення напруги фаз B і C в $\sqrt{3}$ раз приводить до зростання струму через ємності C_B і C_C , абсолютні значення реактивних складових яких

$$|I'_B| = |I'_C| = \sqrt{3} \cdot \omega C \cdot U_{\phi}. \quad (14)$$

Кут між цими струмами стає рівним 60° , реактивна складова струму на землю $I_{\Sigma C} = |I'_B + I'_C| = 2 \cdot I'_B \cdot \cos 30^\circ = 3 \cdot \omega C \cdot U_{\phi}$ тобто

$$|\dot{I}_{\Sigma c}| = 3|\dot{I}_A|. \quad (15)$$

Якщо активну провідність між проводом і землею, зумовлену витоками по ізоляції, короною і діелектричними втратами в ізоляції, позначити через g , то активна складова струму на землю аналогічно із (15) визначається виразом $\dot{I}_{a.з} = 3 \cdot g \cdot \dot{U}_\phi$, а величина повного струму на землю

$$\dot{I}_з = \sqrt{|\dot{I}_{\Sigma c}|^2 + |\dot{I}_{a.з}|^2}. \quad (16)$$

Питомі ємності фаз на землю визначаються конструкцією лінії, діаметром проводів, їх відстанню від землі й іншими показниками. На практиці використовують усереднені значення питомих ємностей: для повітряних ЛЕП (3–35) кВ $C_{пл} = 0,0054 \text{ нФ/км}$; для кабельних ліній $C_{кл} = 0,19 \text{ нФ/км}$. Ємності фазового проводу відносно землі повітряних (ПЛ) і кабельних (КЛ) ліній відповідно рівні: $C_{\phi \text{ пл}} = C_{пл} l_{пл}$; $C = C_{кл} l_{кл}$.

При цьому, одержуємо:

$$\text{– для повітряної ЛЕП, А: } I_{\Sigma c} = \frac{U \cdot l_{пл}}{350};$$

$$\text{– для кабельної лінії, А: } I_{\Sigma c} = \frac{U \cdot l_{кл}}{10},$$

де U - лінійна напруга, кВ.

З векторної діаграми (рис 10, б)) видно, що струм $\dot{I}_{\Sigma c}$ випереджає напругу \dot{U}_N нейтралі на кут 90° .

Компенсація реактивної складової струму замикання на землю дозволяє зменшити струм через дугу до величини, при якій відбувається її самозгасання. Для цього під напругу нейтралі U_n вмикають індуктивну котушку L_K (рис. 11), реактивна складова струму через яку відстає від \dot{U}_N на 90° і компенсує реактивну складову (15) струму на землю.

Індуктивність і активний опір контуру, по якому протікає струм котушки I_K , практично дорівнюють індуктивності L_K і активному опору R_K самої котушки. Тому

$$\dot{I}_K = \frac{\dot{U}_N}{R_K + j\omega L_K} = U_\phi \frac{R_K - j\omega L_K}{R_K^2 + (\omega L_K)^2}. \quad (17)$$

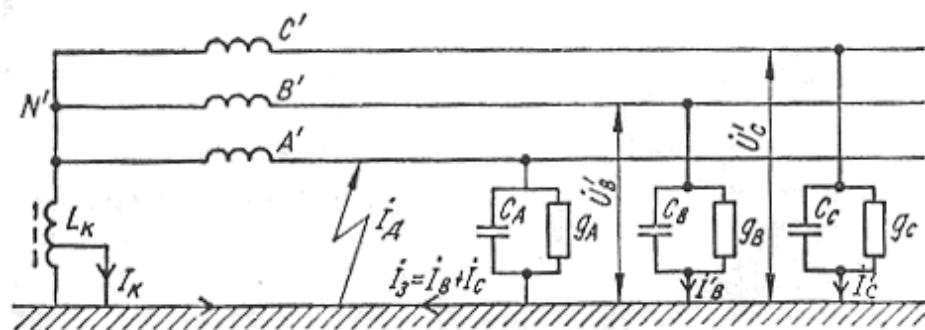


Рисунок 11 - Еквівалентна схема електричної мережі з ДГК при замиканні фази А на землю

З врахуванням $R_K \ll \omega L_K$ вираз (17) переписується у вигляді

$$\dot{I}_K = \dot{U}_\phi \left[\frac{R_K}{(\omega L_K)^2} - j \frac{1}{\omega L_K} \right] = I_{ak} - I_L.$$

Загальний струм дуги дорівнює геометричній сумі повного струму на землю і струму котушки:

$$\dot{I}_D = I_a + j(I_{\Sigma c} - I_L), \quad (18)$$

де
$$I_a = U_\phi \left(3g + \frac{R_K}{(\omega L_K)^2} \right); \quad I_L = \frac{U_\phi}{\omega L_K}.$$

Після перетворення матимемо

$$\dot{I}_D = I_a + jI_{\Sigma c} \cdot (1 - q), \quad (19)$$

де
$$q = \frac{I_L}{I_{\Sigma c}}$$
 - ступінь настроювання котушки.

З врахуванням (15) і (18) матимемо

$$q = \frac{1}{3CL_K} \cdot \frac{1}{\omega^2} = \frac{\omega_0^2}{\omega^2}. \quad (20)$$

Тут ω - власна частота мережі з котушкою в нейтралі. Очевидно, що при $q = 1$ виконується рівність $I_L = I_{\Sigma c}$ (див. рис 12), струм дуги мінімальний і дорівнює I_a . При цьому схема працює в умовах резонансу струмів, тому говорять, що відбувається резонансне заземлення нейтралі, а котушку L_K називають ДГК - дугозагасною, або ЗРОМ - заземлюючим реактором однофазним масляним.

При недостатній потужності ДГК (великий індуктивний опір ωL_K), $I_L < I_{\Sigma c}$ ($q < 1$) - спостерігається режим недокомпенсації, а залишковий струм має ємнісний характер (рис 12). В режимі перекомпенсації (при $q > 1$) в дузі протікає індуктивний струм.

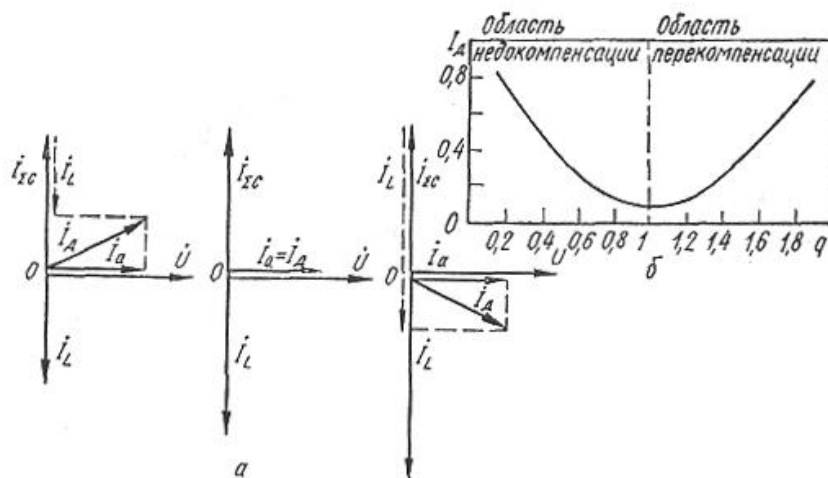


Рисунок 12 - Векторні діаграми (а) і залежність (б) струму дуги від ступеня компенсації

В умовах експлуатації звичайно не вдається отримати $q = 1$. Проте, при невеликих відхиленнях ступеня настроювання від одиниці абсолютна величина струму дуги практично не відрізняється від його активної складової, оскільки

$$I_d = \sqrt{I_a^2 + (I_{\Sigma c} - I_L)^2} . \quad (21)$$

Дугозагасна котушка не лише зменшує струм через дугу і тим полегшує її гасіння, але й знижує швидкість відновлення напруги на дуговому проміжку після гасіння дуги поблизу переходу через нуль струму промислової частоти. ЗРОМ і ДГК знайшли широке застосування в енергосистемах (10–35) кВ.

4. Самостійна робота

Самостійна робота виконується при підготовці до лабораторної роботи.

4.1. Отримати комплект технічної документації на прилади та установку, які використовуються при виконанні лабораторної роботи.

4.2. Ознайомитись з методичними вказівками до виконання лабораторної роботи, експлуатації приладів та установки в цілому.

4.3. В заготовці "Звіт з лабораторної роботи"

4.3.1 нарисувати схему електричних з'єднань приладів та установки в цілому, які використовуються при виконанні лабораторної роботи;

4.3.2 подати розшифрування всіх надписів та позначок на приладах та установці;

4.3.3 обміркувати і записати поетапний хід виконання роботи;

4.3.4 обчислити похибки вимірювання фізичних величин, які визначаються приладами електричної схеми у ході виконання лабораторної роботи;

4.3.5 скласти необхідні таблиці для занесення числових значень вимірюваних величин;

4.3.6 побудувати наближені графіки залежностей вимірюваних фізичних величин;

4.3.7 проаналізувати в комплексі хід роботи і записати нез'ясовані для себе запитання.

5. Опис дослідної установки

Лабораторна робота виконується на лабораторному стенді, принципова схема якого подана на рис. 5.1. Лінія електропередачі напругою (6–35) кВ

моделюється зосередженими фазовими $C1 \dots CN$ і міжфазовими ємностями. Питомі ємності є вхідними параметрами, які вимірюються мостовим методом або розраховуються методом дзеркального відображення за допомогою *рівнянь Максвелла III-го порядку* для кожної досліджуваної ЛЕП номіналом (6–35) кВ. Частинним випадком може бути, наприклад, ЛЕП, у якої питомі ємності рівні $0,005 \text{ мкФ} \cdot \text{км}^{-1}$, відношення міжфазної ємності до фазної рівне 0,25. За допомогою тумблерів $S1 \dots SN$ ($QS1 \dots QSN$) можна моделювати ємності ліній завдовжки (0...200) км з кроком N , залежним від кількості ступенів підбору ємностей (на схемі стенду (див. рис. 5.1) $N = 3$).

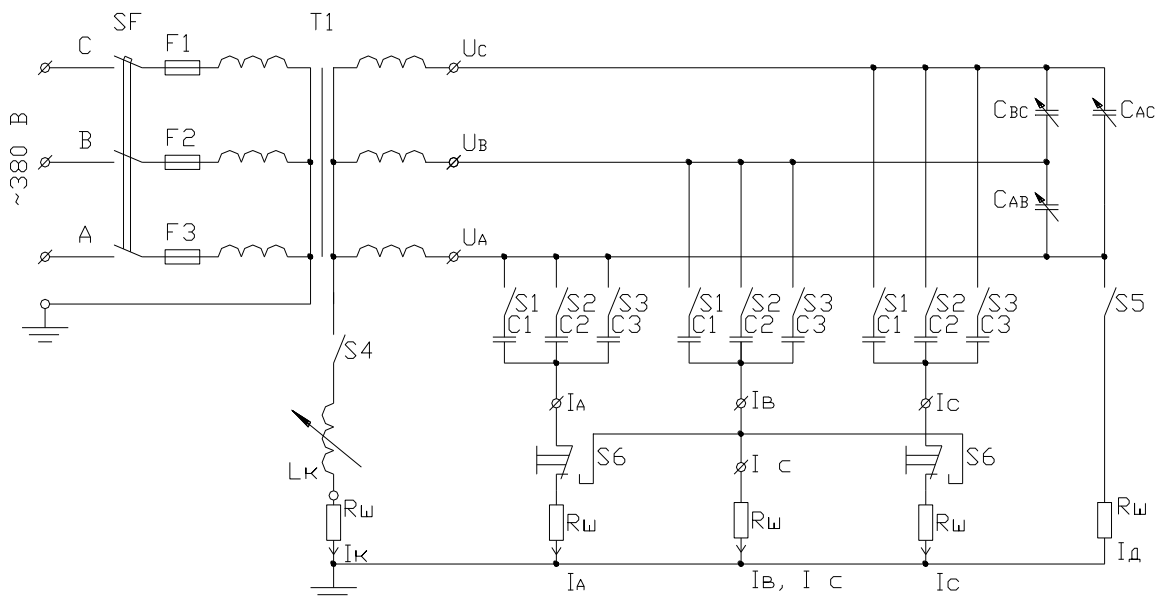


Рисунок 5.1 - Принципова схема стенду

Джерело живлення моделюється трифазною мережею номіналом 380 В – автоматичним вимикачем SF (QF) – запобіжниками $F1...F3$ ($FU1...FU3$) – трансформатором $T1$ ($TV1$), за допомогою яких фазові напруги величиною (24...36) В подаються на електричну схему у місця розміщення гнізд U_A ($XT1$), U_B ($XT2$), U_C ($XT3$).

Заземлюючий реактор однофазний масляний (ЗРОМ) моделюється індуктивною котушкою L_K (TL_K) з лінійною вольт-амперною характеристикою.

Перемиканням декад індуктивність котушки L_K (TL_K) змінюється в межах (0,05...5,00) мГн. Розмикання тумблера $S4$ ($QS4$) приводить до ізолювання нейтралі. Замикання фази A на землю здійснюється тумблером $S5$ ($QS5$).

Фазові і лінійні напруги вимірюються вольтметром $PV1$ з високим вхідним опором (не менше 5 кОм) та відтворюються на екрані осцилографічної трубки (не показане конкретне місцеположення на схемі). Для вимірювання струмів у відповідні ланцюги ввімкнені шунтові малоіндуктивні резистори $R_{ш}$ номіналом 1 Ом, внаслідок чого падіння напруги на них у вольтах чисельно дорівнює струму в амперах. Вимірювання падіння напруги на шунтах також проводиться за допомогою осцилографа та вольтметра. Якщо перемикач $S6$ (SB) знаходиться в положенні, відповідному рис. 5.1, вимірюються струми I_A , I_B , I_C . При протилежному положенні перемикача падіння напруги на $R_{ш}$ фази B пропорційне струму $I_{\Sigma C}$. Крім того, електронний осцилограф та векторметр використовуються для вимірювання фазових зсувів та форми кривої струму і напруги в різних точках схеми.

6 Порядок роботи на лабораторному стенді

1. Ознайомитися зі схемою лабораторного стенду, розміщенням його елементів, ходом виконання роботи, правилами безпеки при роботі на стенді. Провести необхідні додаткові електромонтажні роботи.
2. Встановити взаємне розташування елементів джерела живлення з дослідним лабораторним стендом.
3. Під'єднати гніздо приєднання $XT0$ "Заземлення" стенду до існуючого контуру заземлення.
4. Провести всі необхідні регламентні операції щодо електробезпеки при роботі на стенді і дотримуватися встановлених правил під час проведення досліджень з налаштування ємнісно-індуктивних елементів.
5. Отримавши дозвіл на подачу напруги до лабораторного стенду, з'єднати видимий роз'єм: штепсельні вилку з розеткою.
6. Дотримуючись правил електробезпеки проведення робіт на

лабораторних установках, увімкнути автоматичний вимикач QF (SF).

7. Трифазним регулятором напруги TL встановити заданий рівень напруги, який буде моделювати номінальну напругу кабельної чи повітряної мережі.

8. Контролювати рівень й синусоїдність напруги за допомогою вольтметра PVI ($0 \div 30 \div 50 \div 100$) B та осцилографа EO .

9. Для зміни режиму роботи стенду згідно з отриманим завданням проводити відповідні комутаційні перемикання тумблерами $S4$ ($QS4$) та $S5$ ($QS5$), а також перемикачем $S6$ (SB).

10. Після виконання встановленого комплексу робіт регулятором напруги TL плавно зняти напругу з лабораторного стенду, вимкнути автоматичний вимикач QF (SF) та розімкнути штепсельний роз'єм.

7 Завдання до виконання лабораторної роботи

1. При розімкнених тумблерах $S1 \dots S3$ ($QS1 \dots QS3$) виставити необхідний рівень фазних напруг.

2. Визначити масштаб напруг за допомогою виразу

$$m_U = \frac{U_{НАТ}}{U_{МОД}}, \quad (7.1)$$

де $U_{НАТ} = \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3}}$ - фазова напруга модельованої ЛЕП, kB ;

$U_{МОД}$ - фазова напруга моделі, B .

3. Використовуючи електронний осцилограф чи векторметр побудувати векторну діаграму напруг джерела живлення в режимі холостого ходу з врахуванням того, що довжина вектора в міліметрах відповідає напрузі у вольтах; знайти кути між фазними і лінійними напругами.

4. Вимикачами $S1 \dots S3$ ($QS1 \dots QS3$) увімкнути конденсатори між фазними проводами і землею, ємність яких відповідає вибраній довжині ЛЕП, наприклад $100,0$ $км$.

5. З використанням осцилографа чи вольтметра зняти відліки падіння напруг на шунтових резисторах $R_{ш}$, (роз'єми I_A , I_B , I_C), пропорційні ємнісним струмам між фазними проводами і землею. Згідно виразу (20) розрахувати

величини цих струмів.

6. Визначити масштаб струму за допомогою виразу

$$m_I = \frac{I_{НАТ}}{I_{МОД}}, \quad (7.2)$$

де $I_{МОД}$ – струм моделі, визначений з використанням осцилографа чи вольтметра, A .

7. Заміряти кути φ між фазними струмами і напругами й побудувати векторну діаграму нормального режиму роботи ЛЕП (див. рис. 10, *a*). Результати замірів та розрахунків занести в таблицю 7.1.

Таблиця 7.1 - Результати замірів напруг і струмів у нормальному режимі роботи досліджуваної ЛЕП

$U_{\phi A}$		I_A		φ_A , град.	$U_{\phi B}$		I_B		φ_B , град.	$U_{\phi C}$		I_C		φ_C , град.
мод., B	нат., $кВ$	мод., A	нат., A		мод., B	нат., $кВ$	мод., A	нат., A		мод., B	нат., $кВ$	мод., A	нат., A	
U_{AB}					U_{BC}					U_{AC}				
мод., B		нат., $кВ$			мод., B		нат., $кВ$			мод., B		нат., $кВ$		

8. Замкнути фазу A на землю увімкненням тумблера $S5$ ($QS5$). Заміряти фазні й лінійні напруги; заміряти струми I'_B та I'_C , а також їх суму $I_{\Sigma C}$, рівну I_D ; заміряти необхідні фазні кути й побудувати векторну діаграму, аналогічно п.7. При замірах $I_{\Sigma C}$ використовувати перемикач $S6$ (SB).

9. Увімкнути масштабний аналог дугозагасного реактора – котушку L_K (TL_K) номіналом (0,05...5,00) $мГн$ за допомогою тумблера $S4$ ($QS4$). Заміряти струми, які моделюють струми через ЗДР, ємності ЛЕП, а також струм дугового замикання фази A : I_K , $I_{\Sigma C}$, I_D ; провести дослідження впливу ступеня настроювання індуктивності котушки L_K (TL_K) на величину залишкового струму I_D . При мінімальному значенні струму I_D переконатися в рівності модулів струмів I_K та $I_{\Sigma C}$. Доповнити векторну діаграму аварійного режиму векторами струмів I_K , $I_{\Sigma C}$, I_D , замірними в режимі компенсації.

10. Повторити заміри згідно пп. 5 ... 9 при більшій та меншій довжині

досліджуваної ЛЕП.

11. Результати замірів занести в таблицю 7.2.

Таблиця 7.2 - Результати замірів струмів моделей елементів досліджуваної ЛЕП

Довжина ЛЕП l , км	Струми моделей, А	Індуктивність котушки $L_K (TL_K)$, мГн							
	I_K								
	$I_{\Sigma C}$								
	I_D								
	I_K								
	$I_{\Sigma C}$								
	I_D								
	I_K								
	$I_{\Sigma C}$								
	I_D								

8 Звіт

1. Подати назву лабораторної роботи, її мету та завдання.
2. Накреслити функціональну схему лабораторного стенду та принципову електричну схему його вимірювальної ланки.
3. Описати основні положення, покладені у принцип заміру досліджуваних фізичних величин.
4. Розрахувати основні характеристики моделей досліджуваних елементів ЛЕП згідно ввідних даних, отриманих від керівника лабораторної роботи.
5. Подати розрахунок й векторну діаграму напруг і струмів на моделях досліджуваних елементів ЛЕП у режимі холостого ходу та з під'єднаними ємностями згідно пп. 3 ... 7.
6. Подати розрахунок й векторну діаграму напруг і струмів на моделях досліджуваних елементів ЛЕП у режимі замикання на землю згідно п. 8.
7. Подати розрахунок й векторну діаграму напруг і струмів на моделях досліджуваних елементів ЛЕП у режимі компенсації ємнісних струмів

індуктивним елементом, під'єднаним до нейтралі електромережі згідно п. 9.

8. Пояснити причину зниження залишкового струму на елементах моделі дугового розряду в результаті виконання робіт згідно п. 9.

9. Проаналізувати пропорційність залежності питомих ємностей досліджуваної ЛЕП від величини індуктивності ЗДР. Порівняти дослідні та розрахункові дані.

10. Провести аналіз отриманих результатів досліджень та порівняти з розрахунковими даними.

11. Підвести підсумок виконання лабораторної роботи у висновку.

Контрольні питання

1. Які стаціонарні перенапруги виникають на лінії й на нейтралі трансформатора при замиканні однієї фази на землю в системі з ізольованою нейтраллю?

2. У чому полягає відмінність режимів роботи електричних мереж із заземленою та ізольованою нейтраллю при замиканні фази на землю?

3. У чому полягає відмінність векторних діаграм струмів і напруг при недокомпенсації, перекомпенсації й точному настроюванні дугозагасної котушки?

4. Як залишковий струм у дузі залежить від ступеня настроювання дугозагасної котушки при замиканні однієї фази на землю?

5. Чому міжфазні ємності, зазвичай, не впливають на стаціонарні перенапруги в системах з ізольованою й резонансно заземленою нейтраллю при замиканні однієї фази на землю?

6. Що представляє собою ЗРОМ та як він улаштований?

7. В чому суть процедури вибору числа та потужності дугозагасних реакторів в енергетичній системі?

8. Який вплив справляє дугозагасна котушка на швидкість відновлення напруги у дуговому проміжку?

9. Які вимоги пред'являються до трансформатора при увімкненні в його нейтраль дугозагасної котушки та яка при цьому повинна бути схема з'єднання

його обмоток?

10. В чому суть терміну «резонансне заземлення нейтралі»?

11. В чому полягають переваги та недоліки систем з ізольованою й систем з резонансно заземленою нейтраллю?

12. Опишіть принцип побудови схеми, покладений в основу роботи стенду з моделювання процесів компенсації ємнісних струмів досліджуваної ЛЕП.

Рекомендована література

Базова

1. Бржезицький В. О. Техніка і електрофізика високих напруг : навч. посібн. / В. О. Бржезицький, А. В. Ісакова, В. В. Рудаков ; за ред. В. О. Бржезицького. – Харків : НТУ «ХП». – Торнадо, 2005. – 930 с.

2. Вакуленко О.О. Техніка високих напруг [електронний ресурс] // Інституційний репозитарій ATutor (код дисципліни ID: 1382) : офіційний сайт Тернопіль. нац. техн. ун-ту ім. Івана Пулюя. – Тернопіль, 2012.

3. Техніка високих напруг : метод. вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів факультету електроенерготехніки та автоматики / Укл. В.О. Бржезицький, В.Б. Абрамов, В.М. Козюра. – К. : НТУУ «КП», 2011. – 85 с.

4. Маврін О. І. Техніка та електрофізика високих напруг : конспект лекцій / О. І. Маврін, К.Б. Покровський. – Львів : Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2008. – 100 с.

5. Техніка та електрофізика високих напруг. Лабораторний практикум / В.О. Шостак, О.Р. Проценко, В.Б. Абрамов. - К. : КП ім. Ігора Сікорського, 2020. – 125 с.

Допоміжна

6. Вимірювання високих напруг і великих струмів : навч. посібн. для студентів спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Укл.: В.О. Бржезицький, О.Р. Проценко, М.Ю. Лапоша. – К. : НТУУ «КП», 2016. – 133 с.

7. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Техніка високих напруг» / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова ; укл.: В.Ф. Рой, Д.В. Румянцев. – Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2016. – 58 с.

8. Методичні вказівки з вибору обмежувачів перенапруг для електричних мереж 6-35 кВ / В.О. Бржезицький, В.К. Беляєв, О.С. Ільєнко. – К. : Вид-во «КП», 2001. – 40 с.

9. Приймальні та експлуатаційні випробування електроустаткування : навч. посібн. / В.Б. Абрамов, В.О. Бржезицький, О.Р. Проценко. – К. : НТУУ «КП», 2015. – 218 с..

10. Нормативно-технічна документація:
– Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ : СОУ-Н-МЕВ-40.1-37471933-49:2011. – К. : Вид-во стандартів, 2011. – 192 с.