

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

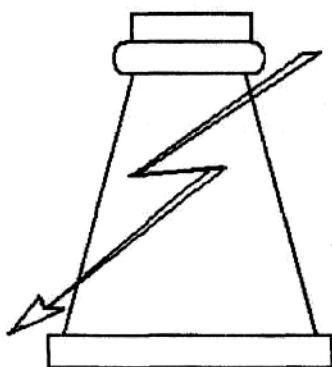
**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до виконання лабораторних робіт

з навчальної дисципліни

## **ТЕХНІКА ВИСОКИХ НАПРУГ**

*(для студентів 4 курсу денної форми навчання напряму підготовки  
6.050701 – Електротехніка та електротехнології спеціальності,  
7.05070103 – Електротехнічні системи електроспоживання)*



**Харків  
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова  
2016**

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Техніка високих напруг» (для студентів 4 курсу денної форми навчання напряму підготовки 6.050701 – Електротехніка та електротехнології спеціальності, 7.05070103 – Електротехнічні системи електроживлення) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад.: В. Ф. Рой, Д. В. Румянцев. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016. – 58 с.

Укладачі д-р фіз.-мат. наук **В. Ф. Рой**,  
ст. викл. **Д. В. Румянцев**

Рецензенти:

**В. В. Рудаков**, доктор технічних наук, професор Харківського національного технічного університету (ХПТ);

**П. П. Рожков**, кандидат технічних наук, доцент кафедри електропостачання та електроживлення міст Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова.

*Рекомендовано кафедрою електропостачання та електроживлення міст, протокол № 3 від 9.03.2016 р.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
Лабораторна робота № 1 Дослідження характеру розподілу напруги по елементам гірлянди ізоляторів.....	6
Лабораторна робота № 2 Дослідження електричної міцності ізоляції, бар'єрного ефекту та ефекту полярності.....	14
Лабораторна робота № 3 Вивчення способів вимірювання високої напруги та методів градуювання випробувального трансформатора.....	21
Лабораторна робота № 4 Дослідження впливу електричних полів на електричну міцність ізоляційних конструкцій.....	32
Лабораторна робота № 5 Дослідження функціональних характеристик апаратів захисту від перенапруг в електричних мережах.....	36
Лабораторна робота № 6 Контроль якості ізоляційних конструкцій за тангенсом кута діелектричних втрат.....	45
Лабораторна робота № 7 Дослідження механізму розвитку ковзних електричних розрядів по поверхні діелектрика.....	50
Список рекомендованої літератури.....	57

## ВСТУП

Курс «Техніка високих напруг» є однією з базових дисциплін для всіх електроенергетичних і електротехнічних спеціальностей. Він присвячений вивченню властивостей та характеристик ізоляційних матеріалів і конструкцій електрообладнання високої напруги в умовах дії екстремальних електромагнітних впливів – високих напруг і великих струмів; умовах забезпечення їх надійної роботи при негативній дії різноманітних зовнішніх факторів; перевищенні робочої напруги, грозових та внутрішніх перенапругах, атмосферних впливів: підвищеної температури, вологості, забруднення, механічних навантажень.

У лабораторії ТВН знаходяться сім експериментальних вимірювальних установок, які укомплектовані необхідним високовольтним обладнанням., що дозволяє виконувати всі необхідні завдання до кожної роботи. Усі лабораторні роботи розподілені на два цикли: до першого відносяться роботи №1 ÷ 4, до другого – роботи №5 ÷ 7. Перед проведенням відповідного циклу робіт на кожній експериментальній установці встановлюється необхідне обладнання.

Для виконання лабораторних робіт кожна студентська група розподіляється на дві підгрупи по три бригади в кожній. Коли перші три бригади виконують лабораторні роботи, інші три бригади захищають і здають виконані і оформлені звіти по уже виконаній роботі.

Перед початком виконання робіт студенти повинні ознайомитися з правилами техніки безпеки (ТБ) при роботі в лабораторії ТВН, прослухати загальний інструктаж щодо роботи з високовольтним обладнанням і поставити свій підпис в журналі інструктажу з ТБ.

### **Основні положення з ТБ при виконанні лабораторних робіт з курсу ТВН**

#### **1 Загальні положення**

Головним фактором небезпеки при виконанні лабораторних робіт є наявність на експериментальних установках високої напруги. Ця обставина вимагає, враховуючи відсутність у студентів навичок роботи з високовольтним обладнанням, додаткових організаційних заходів.

1.1 До виконання лабораторних робіт допускаються студенти тільки після перевірки викладачем знань основних положень з ТБ.

1.2 Кожний студент особисто відповідає за свої дії щодо дотримання вимог ТБ.

1.3 У разі нещасних випадків з людьми зняття напруги для звільнення потерпілого від дії електричного струму має бути здійснено негайно, без отримання попереднього дозволу.

1.4 Студенти, які порушили вимоги положень ТБ, усуваються від роботи і несуть особисту відповідальність.

## 2 Положення з ТБ при виконанні лабораторних робіт

2.1 До виконання лабораторних робіт допускаються студенти, які ознайомились з електричною схемою експериментальної установки й отримали допуск у викладача на проведення роботи.

2.2 Перед початком роботи необхідно ознайомитись з інструкцією до даної лабораторної роботи, перевірити наявність заземлень корпусів трансформаторів, огорожень та конструкцій, справність закриття дверей огороження, а також працездатність електричної, світлової і звукової сигналізації.

2.3 Викладач призначає відповідального за виконання студентами бригади правил ТБ при виконанні ними робіт.

2.4 До подачі напруги на лабораторну установку необхідно переконатись у тому, що інструменти й досліджувані зразки знаходяться в межах огороження, двері огороження зачинені на заціпку. Особливу увагу слід звернути на відстань заземлення до струмоведучих частин лабораторної установки..

2.5 Подача напруги на лабораторну установку може проводитися тільки з дозволу викладача. Перед ввімкненням автомата подачі напруги на лабораторні установки треба голосно сповістити присутніх: **«Подаю напругу !»**

2.6 При проведенні вимірювань лабораторна установка повинна знаходитись під напругою мінімальний час, необхідний для даного експерименту, після чого вона повинна бути негайно відключена. Напруга повинна бути також відключена, якщо є сумнів у працездатності установки.

2.7 Після відключення високої напруги, струмоведучі частини установки, які були під високим потенціалом, треба розрядити за допомогою заземлюючої штанги.

2.8 У процесі роботи при включеній дослідній установці категорично забороняється обходитись об огороження, відключати або закорочувати блокувальні пристрої, залишати установку, що знаходиться під напругою, без нагляду, допускати присутність в лабораторії сторонніх осіб, не зв'язаних з виконанням роботи.

2.9 Категорично забороняється наближатися і доторкатися до лабораторної установки високої напруги при знятому переносному заземленні.

## **Електричні схеми лабораторних установок і особливості ТБ при роботі з ними**

Розглянуті вище правила ТБ є загальнообов'язковими при роботі на всіх високовольтних установках. У лабораторії ТВН знаходяться три лабораторні високовольтні установки, кожна з яких має свою електричну схему і вимагає виконання своїх конкретних правил ТБ.

Лабораторна установка № 1 містить високовольтний випробувальний трансформатор марки АИИ-70. Основні технічні характеристики установки:

- вихідна напруга змінного струму – 50 кВ;
- вихідна напруга постійного струму – 70 кВ;
- потужність випробувальної установки – 2 кВА.

Через однофазний регулятор напруги типу РНО (Т1) на первинну обмотку випробувального трансформатора Т2 (50000/100) подається напруга 0 –100 В. На виході Т2 отримуємо напругу в діапазоні від 0 до 50000 В змінного або (при включенні випрямляючого діоду VDI) – напругу 0 – 70000 В постійного струму.

При роботі з випрямленою напругою струм витоку контролюється мікроамперметром РА1.

### **Особливості вимог ТБ при роботі на установці № 1**

1. При роботі з мікроамперметром необхідно контролювати положення рук і голови оператора і додержувати мінімальну відстань до струмоведучих частин, яка дорівнює 0,8 м.

2. Перед тим, як користуватись мікрометричним гвинтом (перед його роз'єднанням), необхідно його розрядити за допомогою заземлюючої штанги.

3. При роботі з мегаометром оператор повинен знаходитись на діелектричній ковдрі.

Лабораторна установка № 2 оснащена високовольтним випробувальним трансформатором Т2 типу ИОМ 100/25, на вторинній обмотці якого (виводи **0 – а**) можна отримати напругу від 0 до 100 кВ. Резистор R1 виконує функцію струмообмежувача при пробі досліджуваного об'єкта.

При роботі з мостом типу МД-16 від стаціонарної відпайки 100 В РНО подається напруга на трансформатор Т3 (типу И-50 або НОМ-10), на вторинній обмотці якого (виводи **в - с**) отримуємо напругу 10 кВ.

## **Особливості вимог ТБ при роботі на установці № 2**

1. Необхідно контролювати наявність стаціонарного заземлення вимірювального моста типу МД-16, що знаходиться на робочому стенді за межами установки.

2. Використовуючи виносні вимірювальні прилади, слід пам'ятати, що клема приладу знаходиться під небезпечною напругою.

Лабораторна установка № 3 містить спеціальний високовольтний трансформатор Т2. Заводський коефіцієнт трансформації випробувального трансформатора Т2 дорівнює 284. Спосіб подачі напруги на випробувальний трансформатор Т2 такий же, як і в попередній установці № 2.

## **Особливості вимог ТБ при роботі на установці № 3**

1. Не виконувати роботи, знаходячись під гірляндою ізоляторів.

2. При включенні кварцевої лампи користуватися світлозахисними окулярами.

## **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1**

Дослідження характеру розподілу напруги по елементам гірлянди ізоляторів

Мета роботи : ознайомлення з принципом дії амплітудного кіловольметра, конструкцією універсальних вимірювальних штанг типу ШИ-35/110 і ШИ-220; оволодіння практичними навичками роботи зі штангою; вимірювання характеру розподілу напруги по елементам гірлянди підвісних ізоляторів, перевірка їх придатності до подальшої експлуатації.

### **Основні теоретичні відомості**

Універсальні вимірювальні штанги типів ШИ-35/110 і ШИ-220 застосовують для виявлення дефектних підвісних і опорних ізоляторів шляхом вимірювання на них наявності високої напруги, контролю стану лінійних та підстанційних контактних з'єднань. Їх можна використовувати в закритих і відкритих електроустановках та лініях електропередач класу напруги 35,110 і 220 кВ.

Нормальна робота штанг гарантується на висоті не більше 1000 м над рівнем моря при температурі оточуючого середовища від  $-40$  до  $+50$  °С та відносній вологості повітря не більше 80 %.

Робота зі штангами без відключення напруги дозволяється згідно з «Правилами використання та випробування захисних засобів, які застосовуються в електроустановках» тільки в суху погоду!

Штанги не можна використовувати в середовищі з насиченим струмопровідним пилом, а також таким, що містить агресивні пари й газу.

Штанга (рис. 1.1,а) має робочу частину 1, ізолюючу частину 2, ручку захвату 3 і вимірювальний прилад 4.

Робоча частина містить знімні головки з вимірювальними приладами або вилку для зняття накидів проводів.

Ізоляційна частина і ручка захвату виготовлені з ізоляційного матеріалу, причому ручка відокремлена від ізолюючої частини обмежуючим кільцем. Штанга на напругу 110 кВ складається з двох частин, штанга на напругу 220 кВ – з декількох роз'ємних частин, що з'єднуються за допомогою шарнірного замка.

Габаритні розміри штанг: ШИ-35/ПО:  $L = 2830$  мм, і  $L_1 = 610$  мм,  $L_2 = 1799$  мм; маса штанги – 3 кг; ШИ-220:  $L = 3850$  мм, і  $L_1 = 800$  мм,  $L_2 = 2675$  мм, маса штанги – 3,8 кг.

Для контролю стану ізоляторів до штанги кріпиться вимірювальний пристрій з амплітудним кіловольтметром, який має щупи-контакти, що приєднуються до електродів ізолятора (рис. 1.1,б). Принцип контролю стану ізоляторів полягає в порівнянні реальної величини напруги на елементах гірлянди ізоляторів з теоретичною (паспортною) величиною.

Для контролю стану ізоляторів у мережах напругою до 35 кВ додатково застосовують вимірювальну конденсаторну головку, в якій послідовно з амплітудним кіловольтметром ввімкнений конденсатор з робочою напругою 35 кВ. Оскільки кількість ізоляторів у цих мережах складає 2 - 3, то на випадок пробою одного з них, конденсатор запобігає штучному короткому замиканню у процесі проведення вимірювання напруги на ізоляторі амплітудним кіловольтметром.

Гірлянду ізоляторів можна представити у вигляді ланцюжка послідовно з'єднаних ємностей (рис. 1.4) однакової величини:  $C \approx S/d$  (тут  $S$  – площа електродів,  $d$  – відстань між ними). Крім того, кожний ізолятор гірлянди має додаткову ємність відносно проводу  $C'$  і заземленої опори  $C$ ). Через ємності  $C'$  від кожного ізолятора гірлянди струм витікає до землі, внаслідок чого струми через ємності  $C$  зменшуються із збільшенням відстані від лінійного проводу. В цьому випадку падіння напруги  $\Delta U$  на елементах гірлянди  $C$  має вигляд:  $\Delta U_1 > \Delta U_2 \dots > \Delta U_n$ . Максимальна напруга буде на першому від проводу ізоляторі гірлянди. Через ємності  $C'$  від лінійного електроду притікає струм до проміжних електродів, внаслідок чого відбувається часткова компенсація витікаючого струму і крива розподілу напруги дещо вирівнюється. Однак



внаслідок того, що ємність  $C'_1$ , через яку струм витікає, знаходиться під значно вищим потенціалом, ніж ємність  $C$ , по якій струм притікає, ефективної компенсації витікаючих струмів не відбувається. Тому для ефективної компенсації використовують спеціальні ємнісні екрани, які приєднують до першого від лінійного проводу ізолятора, внаслідок чого збільшується ємність  $C$  і крива розподілу напруги дещо вирівнюється.

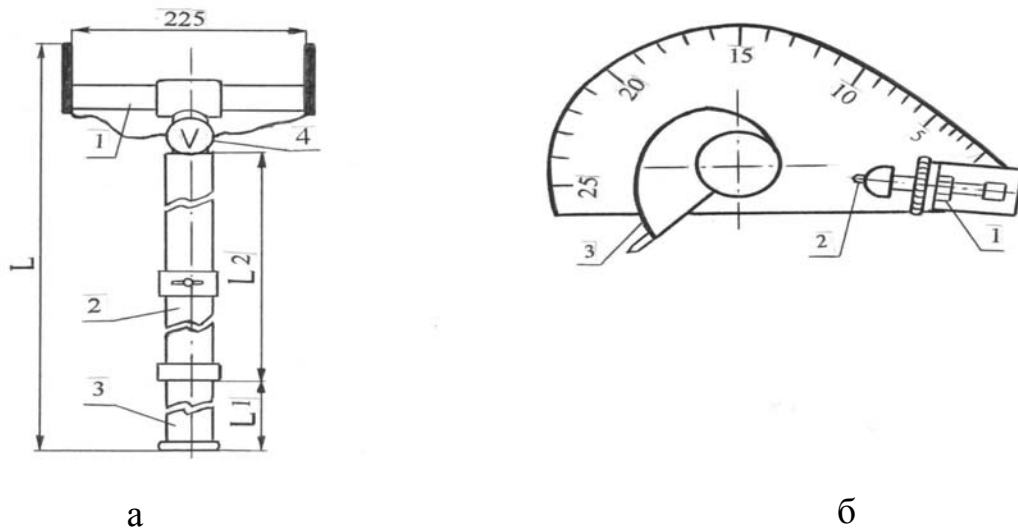


Рисунок 1.1

*а – конструкція універсальної вимірювальної штанги  
(з пристроєм для контролю якості контактних з'єднань);  
б – вимірювальна головка з амплітудним кіловольтметром:*

*1 – регулюючий гвинт, 2 – плоский електрод, 3 – стрижневий електрод*

Для контролю стану контактних з'єднань до штанги приєднують вимірювальний пристрій з мілівольтметром і двома контактами. При наявності перехідного опору контактних з'єднань на ньому виділяється тепло на яке витрачається електроенергія. Здійснюють два виміри: при першому - контакти накладають на те місце струмопроводу, де у нього є контактне з'єднання, при другому - на цілу частину цього струмопроводу. Якість контактного з'єднання визначають порівнянням падіння напруги від струму навантаження на ділянці, що містить контакт,  $\Delta U_k$ , з падінням напруги на ділянці такої ж довжини цілого проводу  $\Delta U_n$  при тому ж струмі навантаження:

$$K = U_k / \Delta U_n \leq 2 \quad (1.1)$$

Останнім часом використовують більш досконалі і високотехнологічні методи контролю якості контактних з'єднань за допомогою тепловізорів, які дозволяють з високою точністю ( $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ) визначати температуру місць з'єднання струмопроводів.

## Послідовність виконання роботи

1. Ознайомитись з теоретичним матеріалом [1-3].
2. Ознайомитись зі схемою лабораторної установки (рис. 1.3) й вимогами з ТБ при роботі з нею.
3. Ознайомитись з конструкцією штанги, що є в лабораторії ТВН.
4. Провести перевірку градуювання штанги за допомогою електростатичного кіловольтметра С-96 або С-100.

Для перевірки градуювання використовують схему установки, показану на рисунку 1.2. На штанзі встановлюють вимірювальну головку з амплітудним кіловольтметром, а до високовольтних клем вимірювального трансформатора приєднують електростатичний кіловольтметр і контакти штанги. При повністю розведених електродах штанги на її контакти послідовно подають напругу 3, 5, 7, 9 кВ і т.д., що вимірюється безпосередньо електростатичним кіловольтметром. При кожному вимірі ручка штанги обертається до моменту виникнення іскрового розряду між стрижневим і плоским електродами кіловольтметра. Якщо величина поданої напруги не відповідає показанням шкали амплітудного кіловольтметра, треба здійснити регулювання величини іскрового проміжку за допомогою регулюючого гвинта і результати вимірювань занести в таблиці 1.1.

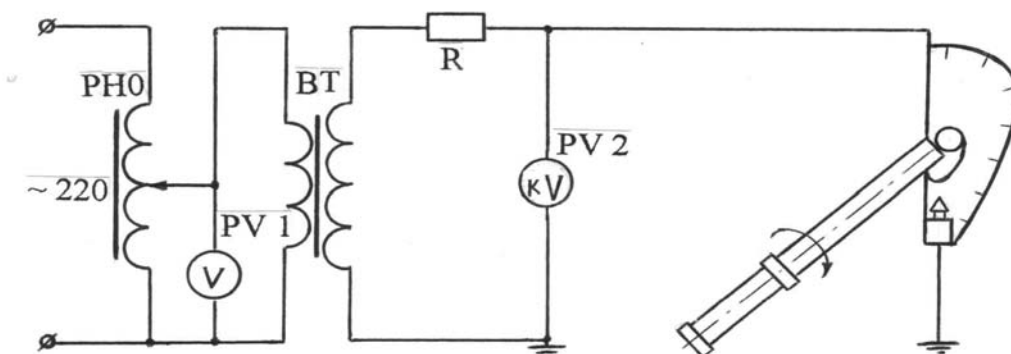


Рисунок 1.2 – Схема градуювання вимірювальної штанги

Таблиця 1.1 – Протокол вимірювань розподілу напруги

Напруга за кіловольтметром, кВ	З арматурою	Без арматури
Покази шкали амплітудного кіловольтметра, кВ	$U_1$ $U_2$ $U_3$ $U_{cp}$	$U_1$ $U_2$ $U_3$ $U_{cp}$

5. За допомогою штанги провести вимірювання характеру розподілу напруги по елементах гірлянди, що складається з п'яти ізоляторів. Для цього необхідно подати на гірлянду зазначену викладачем напругу, використовуючи експериментальну установку, спрощена схема якої наведена на рисунку 1.3.

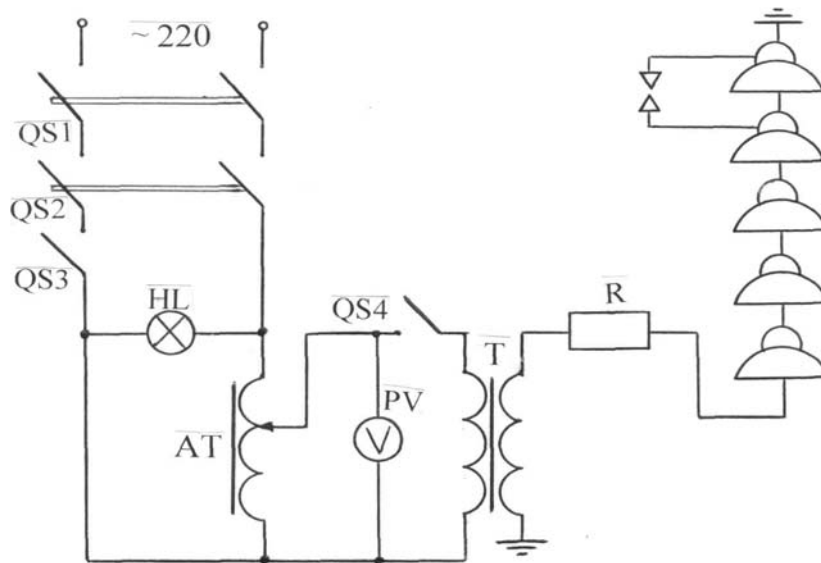


Рисунок 1.3 – Схема експериментальної установки для дослідження характеру розподілу напруги по елементах гірлянди

Вимірювання падіння напруги на ізоляторах гірлянди слід проводити, починаючи з верхнього заземленого ізолятора, тричі для кожного елемента. Після цього знайти середні значення величини напруги і занести в таблицю 1.2.

Таблиця 1.2 – Протокол вимірювань

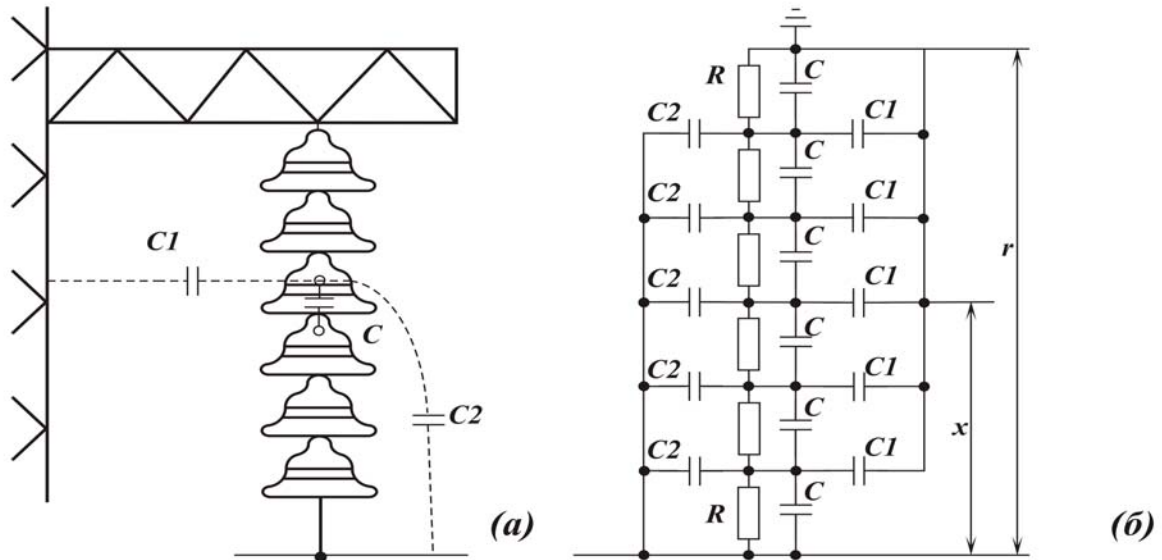
Номер елемента гірлянди	Показання шкали кіловольметра, кВ				Потенціал елемента $U_{ел}$ , кВ	$U_{ел}\% = \frac{U_{ел}}{U_{\Sigma}} \cdot 100\%$	Зауваження
	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_{cp}$			

6. Встановити ємнісний екран на фазному кінці гірлянди й повторити вимірювання за п.5. Результати занести в таблицю 1.2.

7. За даними таблиці 1.2 побудувати графіки розподілу напруги по елементах гірлянди  $U_{ел} = f(n)$  та  $U_{ел}\% = f(n)$ , без екрана і з екраном. Тут  $n$  – номер елемента гірлянди. При розрахунку величини напруги врахувати фактори зовнішнього середовища – тиск і температуру через коефіцієнт  $\delta$ .

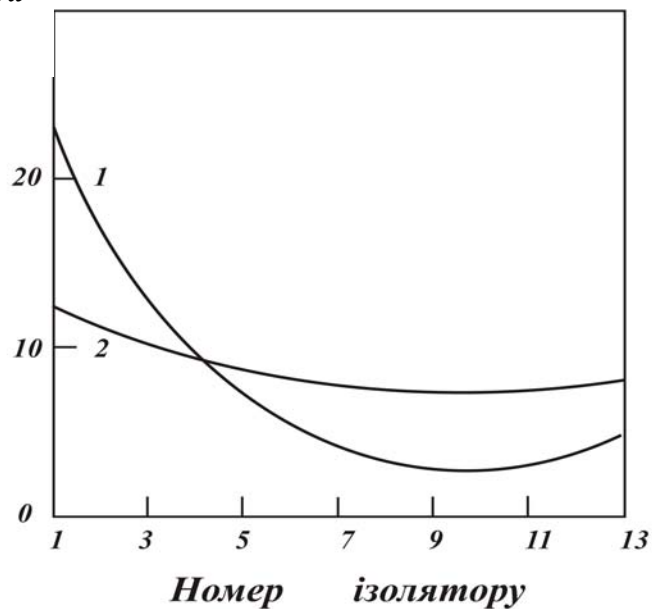
8. Провести аналіз отриманих експериментальних результатів характеру розподілу напруги по ізоляторах гірлянди, використовуючи для інтерпретації результатів еквівалентну електричну ємнісну схему заміщення (рис. 1.4), що складається з ланцюжка послідовно з'єднаних ємностей елементів самої

гірлянди і додаткових ємностей кожного елемента гірлянди відносно заземленої опори й лінійного проводу. Паралельно приєднані до елементів гірлянди резистори показують наявність активного струму витoku через ізолятори гірлянди.



*Гірлянда ізоляторів (а) та її схема заміщення (б)*

*Гірлянда*



*Розподіл напруги по ізоляторах гірлянди без захисної арматури (1) та з арматурою (2)*

Рисунок 1.4 – Еквівалентна електрична схема заміщення гірлянди ізоляторів

## Зміст звіту

У звіті подати скорочене пояснення конструкції і принципу дії вимірювальної штанги, схему проведення дослідів, таблиці з результатами вимірювань, графіки отриманих залежностей, а також сформулювати висновки по роботі.

### Контрольні запитання

1. Чим пояснюється нерівномірність розподілу напруги по елементах гірлянди?
2. Як можна вирівняти розподіл напруги вздовж гірлянди?
3. У межах якої напруги має практичне значення нерівномірність розподілу напруги вздовж гірлянди?
4. Як зміниться напруга на першому елементі від проводу у відсотках та кіловольтах, якщо число елементів у гірлянді збільшити ?
5. Порівняйте розподіл напруги по елементах гірлянди без урахування додаткових ємностей з реальним розподілом.
6. Які функції може виконувати вимірювальна штанга?
7. Чому при проведенні вимірювань головка штанги повинна знаходитись у такому положенні, щоб стрижневий (нерухомий) електрод штанги був спрямований у бік високої напруги?
8. Чому при контролі ізоляторів на напругу 35 кВ обов'язково треба застосовувати конденсаторну головку?
9. Як за допомогою штанги проводять контроль якості контактних з'єднань струмоведучих частин?
10. Який вплив на величину розрядної напруги мають тиск і температура навколишнього середовища?
11. Накресліть еквівалентну електричну схему заміщення гірлянди і поясніть її роботу.
12. Для чого застосовують захисну арматуру, та як вона впливає на характер розподілу напруги по гірлянді ізоляторів ?
13. Поясніть методику градуювання амплітудного кіловольтметра.
14. Чому електроди іскрового кіловольтметра виконані у формі стержень – площина?
15. Як вплине додатковий ізолятор до гірлянди на характер розподілу напруги?
16. Як зміниться розподіл напруги вздовж гірлянди, якщо враховувати додаткові ємності тільки відносно опори?
17. Як зміниться розподіл напруги вздовж гірлянди, якщо враховувати додаткові ємності тільки відносно лінійного проводу?
18. Який характер має розподіл напруги при врахуванні всіх додаткових ємностей?
19. Яку функцію в ланцюгу високої напруги виконує резистор?
20. Які методи використовують для вирівнювання розподілу напруги вздовж гірлянди?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

### Дослідження електричної міцності ізоляції, бар'єрного ефекту та ефекту полярності

Мета роботи : вивчення електрофізичних процесів, що відбуваються при пробі повітряного проміжку при дії високої напруги. Експериментальне дослідження залежності електричної міцності повітряного проміжку від характерові електричних полів, полярності прикладеної напруги і місця розташування бар'єру відносно коронуючого електрода.

#### Основні теоретичні відомості

Роботу виконують на установці № 1 (рис. 2.1). При збільшенні величини напруги прикладеної до між електродного проміжку до деякої критичної величини  $U_k$ , останній поступово втрачає свої ізоляційні властивості й переходить у якісно новий стан, що характеризується різким збільшенням струму через нього. Це явище називають електричним пробоем, а величину потенціалу, при якій відбувається електричний пробій повітряного проміжку, називають розрядною напругою  $U_p$ .

Електрична міцність (тобто розрядна напруга) повітряного між електродного проміжку залежить від різноманітних факторів: полярності прикладеної напруги, ступеня неоднорідності електричного поля між електродами, наявності й місця розташування бар'єру між ними, характеру й інтенсивності джерела зовнішньої іонізації, факторів зовнішнього середовища: температури, тиску, вологості та ін.

Електричний струм в газовому середовищі виникає завдяки переміщенню вільних електронів та іонів в електричному полі, що утворюються з нейтральних атомів і молекул завдяки процесам *іонізації*. Іонізація газу полягає у звільненні або приєднанні електрона до нейтрального атома або молекули й утворення позитивно або негативно заряджених частинок – іонів. В залежності від цього газу поділяються на електропозитивні й електронегативні.

Іонізація повітря стимулюється впливом різноманітних зовнішніх факторів, дія яких полягає в передачі електронам енергії, необхідної для звільнення їх з атома. До числа таких зовнішніх іонізаторів відносяться: радіоактивний фон землі, сонячне або рентгенівське випромінювання, нагрів до температури порядку 5000 °С. Одночасно з процесом іонізації відбувається зворотній процес рекомбінації – перетворення іонів у нейтральні атоми і молекули шляхом захоплення ними вільних електронів. Внаслідок цього



$$n = n_0 \cdot e^{\int_0^x \alpha dx}, \quad (2.1)$$

де  $n_0$  – початкова кількість електронів;  
 $\alpha$  – коефіцієнт ударної іонізації;  
 $x$  – шлях вільного пробігу електрона.

Оскільки маса електронів у  $10^4$  разів менша за маси іонів, то рухливість їх значно більша, тому ударна іонізація відбувається в основному за рахунок зіткнення електронів з атомами й молекулами у випадку, коли кінетична енергія електрона в електричному полі  $W_e = e \cdot E \cdot x$  перевищує енергію зв'язку електрона з атомом ( тут  $e$  – заряд електрона,  $E$  – напруженість електричного поля).

Певну роль у зменшенні електричної міцності повітря відіграють електроди, зокрема катод, при бомбардуванні якого іонами з нього вибиваються вторинні електрони, що прискорюють процес ударної іонізації.

Але не всі зіткнення електронів з атомами приводять до іонізації останніх. У тому випадку, коли кінетична енергія електрона недостатня для того, щоб відбулася іонізація, він тільки збуджує атом, який за час  $10^{-8}$  с повертається до нормального стану енергетичної рівноваги, виділяючи при цьому надлишок енергії у вигляді випромінювання фотона з енергією  $\varepsilon = h\nu$ , де  $h$  – постійна Планка,  $\nu$  – частота електромагнітного випромінювання.

Електрична міцність повітряного проміжку значною мірою визначається напруженістю електричного поля між електродами, яка, в свою чергу, залежить від кривизни поверхні електродів. Тому напруга, при якій починається розвиток іскрового лавинного розряду для електродів різної форми, буде різною: між стержневими електродами вона буде меншою, між плоскими або кулеподібними – більшою. Пробій повітряного проміжку в різко неоднорідному полі (стержень – площина) починається з утворення місцевого локального розряду, який називають **коронним** в місці найбільшої напруженості електричного поля – біля стержневого або коронуючого електрода. Наслідком виникнення коронного розряду в міжелектродному проміжку є утворення електронами й іонами об'ємних зарядів різного знаку. Завдяки різній рухливості електронів та іонів напруга, при якій виникає корона і розвивається іскровий розряд, залежить від полярності напруги, прикладеної до електрода, біля якого напруженість поля вища. Напруга, при якій з'являється коронний розряд, має назву *критичної коронної напруги*. У рівномірних полях коронний розряд при робочій нарузі не виникає, тому важливим завданням конструювання високовольтного електроенергетичного обладнання є *вирівнювання* електричних полів у міжелектродних проміжках.



Розглянемо випадок, коли на стержневий електрод подано позитивний потенціал (рис.2.2, а). Якщо поблизу електрода напруженість електричного поля  $E$  достатньо велика, починається процес ударної іонізації і виникає лавина електронів, спрямована від катода до анода, тобто до стержня. Електрони, маючи більшу рухливість, приходять до стержня і нейтралізуються на його поверхні, знижуючи його потенціал. Більш повільні позитивні іони рухаються до плоского електрода, утворюючи поблизу стержня позитивний об'ємний заряд  $+q$ , який створює поле  $E_+$ , спрямоване протилежно напруженості поля  $E_0$ , – зовнішнього джерела напруги; на відстані від стержня напруженості  $E_+$  і  $E_0$  співпадають. При цьому утворюється розподіл напруженості електричного поля між електродами, показаний на рисунку 2.2, а. Сумарна крива  $E = E_0 + E_+$  тут показує результуючий розподіл напруженості електричного поля між електродами. Зокрема видно, що поблизу стержня позитивний об'ємний заряд  $+q$  зменшує напруженість електричного поля і збільшує її на деякій відстані від електрода. Завдяки цьому напруженість поблизу стержня зменшується, що запобігає виникненню коронного розряду. Одночасно ділянка підвищеної напруженості розповсюджується на іншу частину міжелектродного проміжку, що сприяє його іонізації і розвитку іскрового розряду.

У другому випадку, коли стержневий електрод має негативний потенціал, картина розподілу напруженості електричного поля буде суттєво іншою (рис. 2.2,б). Лавини електронів, рухаючись від стержневого до плоского електрода, залишають після себе позитивний об'ємний заряд  $+q$ . Опинившись між позитивно зарядженим об'ємним зарядом  $+q$  і позитивно зарядженим плоским електродом, електрони втрачають свою швидкість і більша їх частина захоплюється молекулами кисню з утворенням малорухомих негативно заряджених іонів  $-q$ , які утворюють поле об'ємного заряду  $-E_-$ . Результуюча крива розподілу напруженості поля  $E$  складається з трьох компонент: поля зовнішнього джерела напруги  $E_0$ , поля позитивного об'ємного заряду  $E_+$  і поля негативно об'ємного заряду  $E_-$  – (рис. 2.2,б). З рисунку 2.2,б видно, що об'ємні заряди в цьому разі збільшують напруженість поля поблизу стержня, сприяючи виникненню корони, і водночас знижують напруженість між позитивним і негативним об'ємним зарядами. Це звужує ділянку можливої іонізації і зменшує імовірність розвитку іскрового розряду.

Таким чином напруга, при якій виникає корона, вища при позитивному потенціалі стержня, тоді як розрядна напруга (і, відповідно, електрична міцність повітряного проміжку) вища при негативному потенціалі стержня.

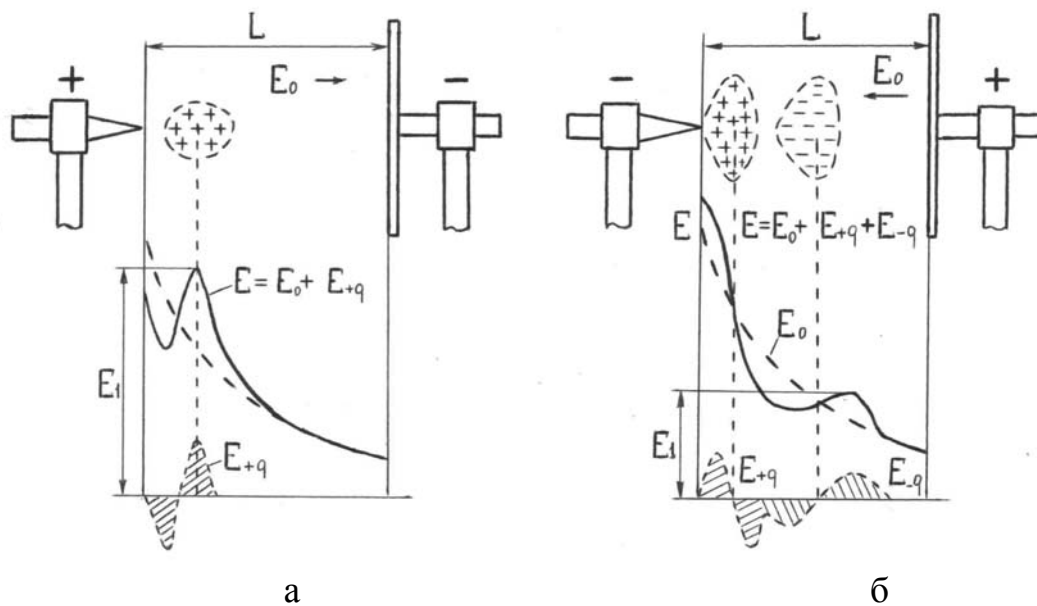


Рисунок 2.2 – Розподіл напруженості електричного поля між електродами:

*а – на стержневий електрод подано позитивний потенціал;*

*б – на стержневий електрод подано негативний потенціал*

Якщо в міжелектродному проміжку розташувати бар'єр – тонку діелектричну пластину, то електрична міцність його суттєво зростає. Це пояснюється тим, що тонкий бар'єр не є перешкодою для електронів, тоді як іони, маса яких в  $10^4$  раз більша, затримуються ним і завдяки силам електростатичного розштовхування рівномірно розподіляються по поверхні пластини, утворюючи додатковий квазіелектрод. У результаті поле між бар'єром і плоским електродом стає квазіоднорідним, а між коронуючим електродом і бар'єром зменшується, що значно збільшує електричну міцність між електродного проміжку. Напруженість поля в проміжку між стержнем і бар'єром, що заповнений іонами одного знаку, мала і там протікає невеликий струм, поповнюючи заряд бар'єра, який зменшується завдяки струмам витоку.

### Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з теоретичним матеріалом, присвяченим електричним явищам в газах, за підручниками [1-3].
2. Вивчити схему лабораторної установки (рис. 2.1) і ознайомитись з вимогами ТБ при роботі з нею.
3. Перевірити вихідне положення регулятора напруги і комутаційних апаратів.
4. Дослідити залежність величини розрядної напруги від відстані між електродами в однорідному полі.

Для цього необхідно:

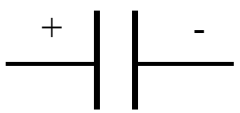
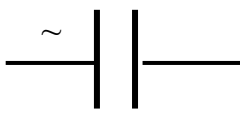
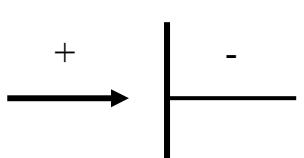
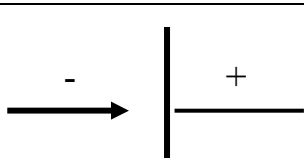
– закріпити на установці дископодібні електроди;

- зачинити двері огороження;
- ввімкнути установку в мережу 220 В (повинна загорітися зелена сигнальна лампочка);
- встановити величину розрядного проміжку згідно з таблицею 2.1;
- ввімкнути автоматичний вимикач захисту на апараті АИИ-70 (при цьому повинна загорітися червона сигнальна лампочка);
- повільно підвищувати напругу (із швидкістю 1 кВ/с) до моменту пробую (спрацьовує реле максимального струму і апарат АИИ-70 вимкнеться);
- результати вимірювання розрядної напруги занести в таблицю 2.1.

5. Дослідити залежність розрядної напруги від відстані між електродами для змінної напруги й від полярності напруги для різко неоднорідного електричного поля. Послідовність проведення вимірювань аналогічна попередньому досліду. Результати вимірювань занести в таблицю 2.1.

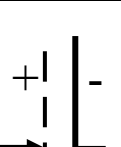


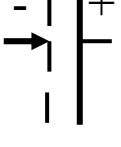
6. Вивчити залежність величини розрядної напруги від відстані між стержневим електродом і бар'єром для змінної напруги, і від полярності прикладеної напруги при постійній відстані між електродами  $L = 25$  мм.

Таблиця 2.1 – Протокол вимірювань

№ п/п	Форма електродів та їх полярність	$L$ , мм	$U_p$ , кВ (ефект)	$U_p$ , кВ (max)
1		10		
		20		
		25		
		30		
		40		
2		10		
		20		
		25		
		30		
		40		
3		10		
		20		
		25		
		30		
		40		
4		10		
		20		
		25		
		30		
		40		

Перед кожним вимірюванням треба встановлювати новий бар'єр. Результати вимірювань занести в таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Протокол вимірювань

№ п/п	Форма електродів та їх полярність	Відстань між бар'єром і стержнем, мм									
		1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	
1		Напруга розрядна (ефективна) $U_p$ , кВ									
2		Напруга пробою, $U_p$ , кВ									
3		Напруга розрядна (ефективна) $U_p$ , кВ									
4		Напруга пробою $U_p$ , кВ									

### Зміст звіту

У звіті необхідно навести спрощену схему лабораторної установки, результати вимірювань і розрахунків (табл. 2.1 і 2.2), графіки отриманих залежностей, їх якісний і кількісний аналіз. Зокрема чітко визначити характер і величину зміни електричної міцності повітряного проміжку, вплив бар'єру на електричну міцність, оптимальне місце встановлення бар'єру та значення ефекту полярності. У висновках навести інтерпретацію отриманих експериментальних результатів.

### Контрольні запитання

1. Що таке іонізація, як відбувається процес ударної іонізації газу?
2. У чому полягає причина виникнення коронного і стримерного розряду?
3. Який механізм впливу зовнішнього іонізатора на електричну міцність повітряного проміжку?
4. При якій полярності стержня електрична міцність проміжку стержень-площина більша? Як це пояснити?
5. Поясніть механізм впливу бар'єру на електричну міцність розрядного проміжку при позитивному і негативному потенціалі стержня.

6. Наведіть приклади використання бар'єрів в ізоляції високовольтного електричного обладнання.

7. Як впливає однорідність електричного поля на величину пробивної напруги, які засоби використовують для регулювання однорідності електричних полів в електроенергетиці?

8. Які практичні рекомендації щодо конструювання високовольтного обладнання можна запропонувати, виходячи з ефекту полярності та бар'єрного ефекту?

9. Яка причина свічення, що супроводжує коронний розряд?

10. Чим відрізняється стан збудженого атома від стану іонізованого?

11. Що таке електронегативні й електропозитивні гази, які з них мають більшу електричну міцність?

12. Що таке ефективний коефіцієнт ударної іонізації, який його аналітичний вигляд?

13. Як відбувається процес вторинної іонізації в об'ємі газу і на катоді?

14. Поясніть механізм сходинкової іонізації.

15. Що являє собою планетарна модель атома ?

16. Поясніть, чому при імпульсній напрузі бар'єри малоефективні?

17. Поясніть залежність електричної міцності проміжку від розташування бар'єру.

18. Дайте визначення коефіцієнта вторинної іонізації.

19. Назвіть основні види й механізми іонізації.

20. Який вплив на процеси іонізації мають однорідні й неоднорідні електричні поля?

### **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3**

#### **Вивчення способів вимірювань високої напруги та методів градування випробувального трансформатора**

Мета роботи : вивчення основних методів вимірювання високої напруги промислової частоти і методики градування випробувального трансформатора кульовими розрядниками; набуття практичних навичок вимірювання високої напруги різними приладами; дослідження залежності величини напруги вторинної обмотки випробувального трансформатора  $U_2$  від напруги  $U_1$  на первинній обмотці:  $U_2=f(U_1)$ ; вивчення розподілу напруги по елементах ємнісного діляника.

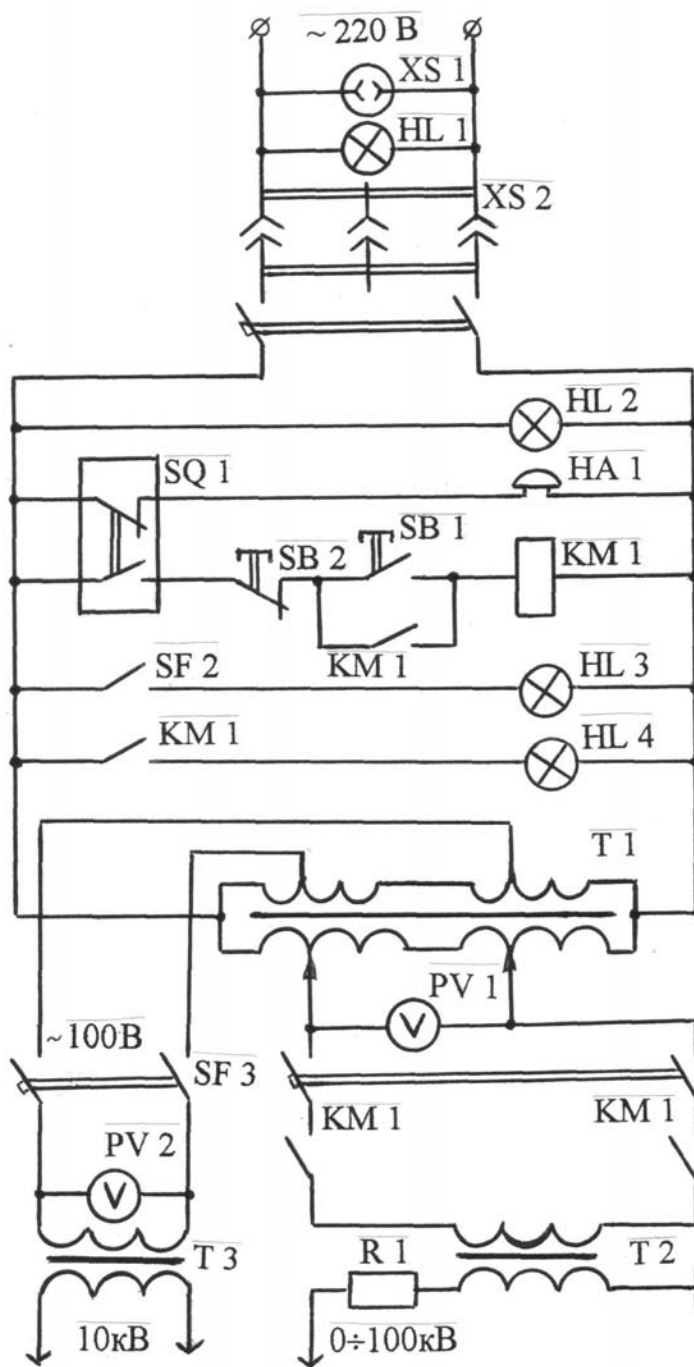
## Основні теоретичні відомості

У лабораторних умовах висока напруга промислової частоти створюється за допомогою високовольтних випробувальних трансформаторів, для яких характерна підвищена величина індуктивності розсіювання (3-12 %), оскільки із зростанням номінальної напруги трансформаторів збільшується відстань між обмотками вищої і нижчої напруги. Схема лабораторної установки з випробувальним трансформатором наведена на рисунку 3.1. У порівнянні з силовими трансформаторами випробувальні трансформатори мають значно більші коефіцієнти трансформації і значно меншу потужність, їх ізоляція розрахована на значно меншу електричну міцність. Відносно низький рівень ізоляції цих трансформаторів обумовлений такими факторами:

- короткочасною роботою;
- роботою, в основному, при напругах, значно нижчих номінальної напруги вторинної обмотки трансформатора;
- відсутністю атмосферних перенапружень.

При проведенні високовольтних випробувань контроль напруги може здійснюватись на первинній або вторинній обмотках випробувального трансформатора – залежно від величини ємності (потужності) об'єкта, що досліджується.

При випробуваннях енергетичного обладнання великої ємності ( $C_0 > 500$  пф) випробувальний трансформатор виявляється навантаженим на ємнісне навантаження. Його схема заміщення і векторна діаграма роботи мають вигляд, наведений на рисунку 3.2. З векторної діаграми випливає, що величина напруги на об'єкті  $U_2$  залежить від ємності обладнання тим більше, чим більша ємність випробувального об'єкта. Це означає, що вимірювання напруги на первинній обмотці трансформатора може призвести до значного перебільшення нормативної випробувальної напруги. Тому необхідно здійснювати вимірювання на високовольтній стороні випробувального трансформатора.



	~ 220 В
	Розетка 220 В
	Лампа сигнальна ~ 220 В
	Розетка розрива ~ 220 В
Сигналізація	Ячейка ввімкнута
	Дзвоник блокування дверей
	Пускач включення високої напруги
Сигналізація	Готовність включення високої напруги
	Висока ввімкнута
	Регулятор напруги
	Вимірювання напруги
	Включення високої напруги
	Трансформатор високовольтний

Рисунок 3.1 – Схема лабораторної установки № 2

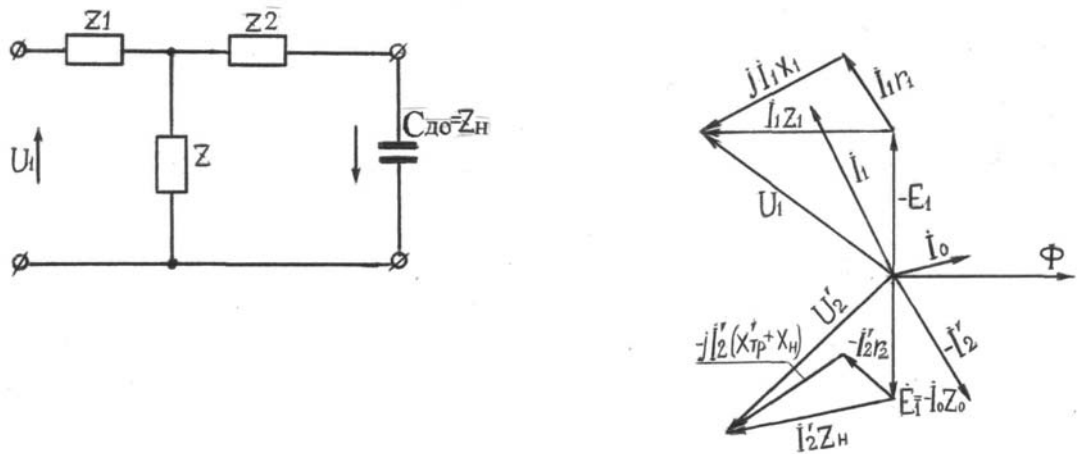


Рисунок 3.2 – Схема заміщення та векторна діаграма роботи випробувального трансформатора

При випробуванні ізоляції електрообладнання *малої ємності* (трансформатори струму, опорні ізолятори, комутаційні апарати та ін., коли  $C_0 \leq 500$  пф) вимірювання напруги може здійснюватись на низьковольтній стороні трансформатора, а напруга на високовольтній стороні визначається за допомогою заводського коефіцієнта трансформації випробувального трансформатора.

Більш точно величина напруги на високовольтній стороні може бути визначена за градуювальною кривою випробувального трансформатора  $U_2=f(U_1)$ . Оскільки для випробувальних трансформаторів ця залежність може бути нелінійною (рис. 3.3,б), то існує необхідність знаходження експериментальної залежності напруги на вторинній обмотці  $U_2$  від величини напруги на первинній  $U_1$ .

При побудові градуювальної кривої  $U_2=f(U_1)$  для вимірювання напруги на високовольтній обмотці трансформатора можна використовувати кульові розрядники, що мають назву *амплітудних кіловольтметрів*. Вимірювання високої напруги кульовим розрядником засновано на тому, що розрядна напруга між двома кулеподібними електродами залежить від відстані між кулями, діаметра цих куль і способу їх підключення (за симетричною або несиметричною схемою) до джерела високої напруги (рис. 3.3,а). Діаметр кулеподібних електродів визначається величиною вимірювальної напруги (табл. 3.1)



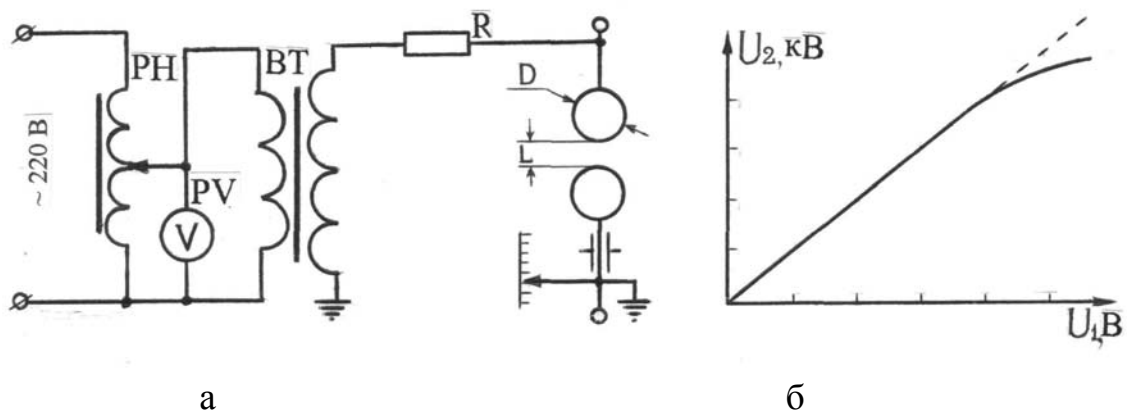


Рисунок 3.3

*а – схема вимірювання високої напруги кульовим розрядником;*

*б –приклад градуувальної характеристики випробувального трансформатора*

Таблиця 3.1 – Максимальна напруга, що вимірюється кульовим розрядником

Діаметр куль, см	2	5	6,25	10	12,5	15	25	50	75	100	150	200
$U_2$ max, кВ	40	90	116	170	210	250	380	720	950	1400	2000	2700

Для забезпечення необхідної точності вимірювань в межах  $\pm 3\%$  максимальне допустиме значення відношення  $L/D$  не повинно перевищувати 0,75. Для захисту джерела високої напруги при пробі кульового розрядника від короткого замикання та перенапружень послідовно з розрядним проміжком включено захисний резистор, що обмежує струм у мережі і водночас запобігає обгорянню електродів. Резистор повинен бути безіндуктивним і мати лінійну характеристику. Величина опору резистора визначається з умови не менше 2 Ом на 1 В напруги. На практиці використовують фарфорові, скляні або бакелітові трубки, залиті дисцильованою водою.

При симетричному включенні куль одну половину захисного резистора приєднують до одного полюса, а іншу – до другого. Якщо використовується несиметрична схема вимірювань із заземленим електродом, то захисний резистор приєднується до незаземленого електрода.

Розраховані значення розрядних напруг для кульового розрядника з кулями діаметром 62,5 мм при нормальній щільності повітря ( $\delta=1$ ) наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Величина розрядних напруг кульового розрядника Ø62,5 мм

Розрядна відстань, см	0,6	0,8	1,0	1,5	2,0	2,4
Розрядна напруга, кВ	20,2	26,2	31,9	45,5	58,5	67,5

Найбільш розповсюдженими приладами для вимірювання високої напруги є кульові розрядники, лабораторні випробувальні трансформатори, електростатичні кіловольтметри. Найбільш ефективним методом вимірювання високої напруги є використання електростатичного кіловольтметра. У тому випадку, коли кіловольтметр має обмежений діапазон вимірювання напруги, який не дає змоги проводити вимірювання на високовольтній стороні трансформатора, використовують ємнісні або резистивні дільники напруги. Найбільш часто використовують ємнісні дільники, оскільки багатoelementний ізолятор є по суті ємнісним дільником напруги.

**Основні вимоги до ємнісного дільника :**

- робоча напруга дільника повинна відповідати випробувальній напрузі об'єкта;
- особиста ємність дільника повинна бути значно менша за ємність – випробувального об'єкта.

На практиці використовують дві схеми включення ємнісних дільників напруги:

- схема з додатковою ємністю (рис. 3.4);
- схема з ємнісним дільником напруги (рис. 3.5).

Якщо особиста ємність електростатичного кіловольтметра змінюється в широких межах при переміщенні його рухомої частини, – перевагу має схема з ємнісним дільником.

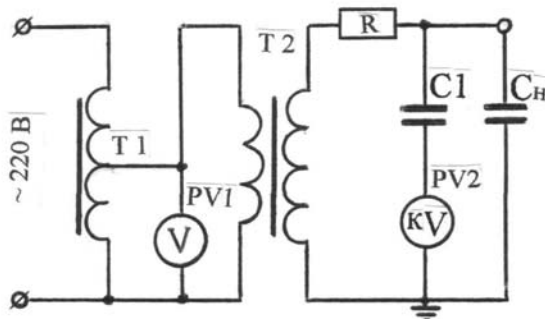


Рисунок 3.4 – Схема з додатковою ємністю

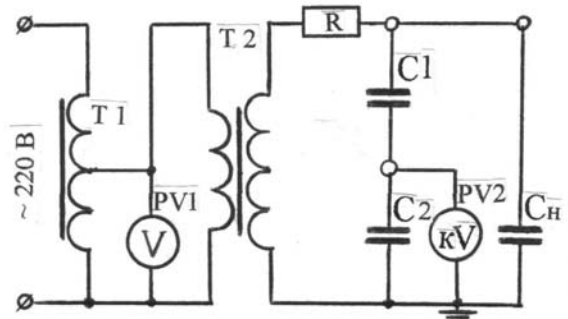


Рисунок 3.5 – Схема з ємнісним дільником

У даній роботі необхідно проградувати однофазний високовольтний підвищуючий трансформатор типу ИОМ-100/25 потужністю 25 кВА, максимальною напругою 100 кВ. Градування його за допомогою кульового розрядника може здійснюватись двома методами.

1. На первинній обмотці встановлюють напругу  $U_1$ , що відповідає деякому цілому показникові шкали вольтметра, а потім кулі, які попередньо були розведені на максимально можливу відстань, починають поступово зближувати до виникнення розряду. Після цього фіксується довжина розрядного проміжку  $L$  і за таблицями або градуовальною кривою кульового розрядника визначається напруга  $U_{2max}$ , що відповідає напрузі  $U_1$  первинної обмотки трансформатора. Кульовий розрядник має пристрій для дистанційного вимірювання довжини іскрового проміжку  $L$  безпосередньо під напругою.

2. При другому методі кульові електроди встановлюють на відстані  $L$ , що відповідає деякому значенню напруги  $U_{2max}$ . Після цього вмикають випробувальний трансформатор і напругу повільно збільшують до моменту виникнення розряду в іскровому проміжку, фіксуючи за вольтметром величину напруги  $U_1$ .

Перевага цього методу полягає у тому, що для градування не потрібний розрядник з дистанційним управлінням. У лабораторній роботі можуть використовуватись обидва методи. При роботі з кульовим розрядником необхідно стежити за тим, щоб кульові електроди знаходились на відстані не менше п'яти їх діаметрів від інших частин обладнання. Поверхню куль треба тримати в чистоті.

Лабораторія ТВН обладнана електростатичними кіловольтметрами типів С96 та С100. Кіловольтметр С96 являє собою переносний тридіапазонний прилад електростатичної системи із світловим відліком, який використовується для вимірювання напруги в мережах постійного та змінного струмів у діапазоні частот від 2 Гц до 20 МГц. Діапазони вимірювання напруги приладу складають 15 – 30 – 75 кВ. Живлення освітлювального пристрою здійснюється від мережі змінного струму напругою 220 В. При вимірюванні в симетричних схемах з незаземленим провідником живлення здійснюється змінним або постійним струмом напругою 6 В.

Кіловольтметр С100 є переносним тридіапазонним лабораторним приладом електростатичної системи із світловим відліком величини напруги. Діапазони вимірювання: 25 – 50 – 75 кВ.

#### **Основні застереження щодо експлуатації :**

– заземлені металеві деталі установки не повинні знаходитись ближче 1 м від електродів ввімкнутого приладу;

- ізоляційні елементи установки не повинні знаходитись ближче 0,5 м від електродів;
- прилад повинен бути встановлений на ізоляційну підставку висотою не нижче 0,5 м.

### **Порядок проведення вимірювань кіловольтметром**

За допомогою ручки, розташованої з правої сторони електрода кіловольтметра, встановити шкалу, що відповідає величині напруги, яка вимірюється.

Встановити відповідний діапазон вимірювання. Для цього відвести вгору пружину фіксатора і пересунути рухомий електрод уздовж станини разом з опорним ізолятором.

Перед проведенням вимірювань необхідно ввімкнути освітлювач, встановивши голівкою коректора світлової риски на нульову позначку шкали приладу. Чіткість зображення світлового вказівника регулюється за допомогою гвинта – у вертикальній площині, а за допомогою барашка – в горизонтальній.

### **Порядок виконання роботи**

1. Ознайомитись з теоретичним матеріалом за підручниками [1-4].
2. Ознайомитись зі схемою лабораторної установки (рис. 3.1) та вимогами ТБ при роботі на установці.
3. Перевірити початкове положення регулятора напруги та комутуючих апаратів.
4. Скласти схему (рис. 3.3,а) і провести градування випробувального трансформатора за допомогою кульового розрядника.

Результати вимірювань занести в таблицю 3.3. Кожне вимірювання здійснювати тричі для одного значення  $L$ , визначаючи потім середнє арифметичне. У розрахунках необхідно внести поправку на температуру  $T$  і тиск повітря  $p$  під час вимірювань. Для цього визначають відносну щільність повітря:

$$\delta = \frac{0,386 \cdot p}{276 + T}, \quad (3.1)$$

де  $p$  – тиск повітря в кПа;  $T$  – температура повітря в °С.

Тоді точне значення величини напруги на вторинній високовольтній обмотці випробувального трансформатора буде:

$$U'_{2\max} = U_{2\max} \cdot \delta, \quad (3.2)$$

де  $U'_{2\max}$  – розрядна напруга при нормальних умовах (визначається з табл. 3.2.)

Таблиця 3.3 – Градування випробувального трансформатора кульовим розрядником

<b>L, см</b>	<b>Напруга на низьковольтній стороні трансформатора, В.</b>				<b>Напруга на високовольтній стороні трансформатора, кВ</b>			<b>Коефіцієнт трансформації, K</b>	<b>Зауваження</b>
	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_{cp}$	$U_{2\max}$	$U'_{2\max}$	$U'_{2ef}$		
									$p=$ $T=$

За одержаними даними (в табл. 3.3) побудувати градувальну криву випробувального трансформатора і визначити середнє значення його коефіцієнта трансформації  $K_{cp}$ .

5. Скласти схему для вимірювання високої напруги за допомогою ємнісного дільника (рис.3.5) і дослідити розподіл напруги по елементах опорного ізолятора типу ИОС-110. Напругу на високовольтній стороні трансформатора  $U_2$  встановити за рекомендацією викладача. Результати досліджень занести в таблицю 3.4.

Таблиця 3.4 – Протокол вимірювань

<b>Номер елемента ИОС-110</b>	<b>Напруга на елементі, кВ</b>	<b>Відносний розподіл напруги</b>	<b>Коефіцієнт розподілу напруги</b>	<b>Зауваження</b>

За даними таблиці 3.4 побудувати графіки розподілу напруги по елементах ємнісного дільника.

6. Для вказаного викладачем значення ємності досліджуваного об'єкта і величини випробувальної напруги визначити необхідну потужність  $P$  випробувального трансформатора, ВА;

$$P = U_{вин}^2 \cdot \omega \cdot C_0, \quad (3.3)$$

де  $U_{вин}$  – випробувальна напруга;  $C_0$  – ємність об'єкта, Ф;  $\omega$  – кутова частота струму.

7. Провести випробування обладнання великої ємності.

### Методика проведення випробувань:

– відключити досліджуваний об'єкт для запобігання впливу його ємності на величину напруги на високовольтній стороні трансформатора (рис. 3.5). За допомогою отриманих графіків вибрати номер елемента ємнісного діляника і підключити до нього кіловольтметр;

– підвищити напругу до необхідної величини, контролюючи її вольтметром на низьковольтній стороні трансформатора  $PV_1$ . Величину напруги внести в таблицю 3.5;

– визначити показання кіловольтметра, підключеного до ємнісного діляника, і записати їх в таблицю 3.5;

– вимкнути установку і підключити досліджуваний об'єкт;

– ввімкнути установку;

– підвищити напругу на досліджуваному об'єкті, здійснюючи контроль за кіловольтметром  $PV_2$ , який підключений до ємнісного діляника. Занести показання приладів  $PV_1$  і  $PV_2$  в таблицю 3.5.

Таблиця 3.5 – Протокол вимірювань  $P_{вт}$ , кВт

Параметри контролю	Об'єкт дослідження	
	відключений	ввімкнений
Випробувальна напруга на високовольтній стороні випробувального трансформатора $U_2$ , кВ		
Напруга на низьковольтній стороні $U_1$ , В		
Показання кіловольтметра ємнісного діляника, $U_q$ , кВ		
Розрахована напруга на високовольтній стороні $U_{2p} = U_1 \cdot k_{тр}$ , кВ		

### Зміст звіту

У звіті навести схеми виконаних дослідів, таблиці з даними експериментів (табл. 3.3 - 3.5), градувальну криву, графіки розподілу напруги по елементах ємнісного діляника в абсолютних і відносних одиницях, графік залежності коефіцієнта поділу ємнісного діляника від номера елемента, а також висновки за результатами аналізу експериментальних даних за п. 4-7.

## Контрольні запитання

1. Які методи використовують для вимірювання високої напруги?
2. Яка методика випробування обладнання високої ємності?
3. Які схеми використовують для розширення діапазону вимірювання напруги електростатичним кіловольтметром?
4. Яка максимальна помилка вимірювань при використанні середнього значення коефіцієнта трансформації?
5. В яких випадках і чому необхідно проводити вимірювання напруги на високовольтній стороні трансформатора?
6. За рахунок чого відбувається відхилення від заводського коефіцієнта трансформації вимірювального трансформатора?
7. За даними таблиці 3.4 знайдіть значення напруги на високовольтній стороні трансформатора при підключенні до третього елемента ємнісного дільника та подачі 72 кВ.
8. Накресліть і поясніть схему заміщення при вимірюванні обладнання великої ємності.
9. З допомогою векторної діаграми (рис. 3.2) поясніть вплив величини ємнісного навантаження на роботу випробувального трансформатора.
10. Поясніть роботу схеми (рис. 3.4) з додатковою ємністю.
11. Яке співвідношення ємностей дільника необхідно для отримання напруги 30 кВ, якщо робоча напруга 110 кВ?
12. Поясніть принцип дії електростатичного кіловольтметра.
13. Як згідно з рисунком 3.3 проводять вимірювання високої напруги кульовим розрядником?
14. Які методи застосовують, щоб уникнути відхилення коефіцієнта трансформації від лінійності?
15. Яким чином можна розширити діапазон вимірювання кіловольтметра?
16. Чому існує залежність величини розрядної напруги від діаметра кулі?
17. Які переваги й недоліки симетричної та несиметричної схем вимірювання напруги кульовими розрядниками?
18. Назвіть два методи градування випробувального трансформатора кульовими розрядниками.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

### Дослідження впливу електричних полів на електричну міцність ізоляційних конструкцій

Мета роботи : вивчення електрофізичних процесів, що відбуваються при пробі повітряного проміжку при змінному струмі; експериментальне дослідження залежності розрядних напруг повітряних проміжків від характерові електричних полів, відстані між електродами, а також впливу зовнішнього іонізатора на електричну міцність ізоляційних конструкцій.

### Основні теоретичні відомості

Роботу виконують на лабораторній установці №3 (рис. 4.1).

Оскільки процес розвитку і формування розряду відбувається на декілька порядків швидше, ніж півперіод змінної напруги частотою 50 Гц, то величина розрядної напруги повітряних проміжків при змінній і постійній напрузі для однорідного поля практично однакова. При неоднорідному полі в міжелектродному проміжку, згідно з принципом найменшої дії, розряд відбувається (відповідно до ефекту полярності) в момент, коли на стержні «плюс», а на площині – «мінус».

Електричні розряди, які можуть існувати тільки при наявності зовнішнього іонізатора, називають *несамостійними* газовими розрядами. Якщо носії струму, які потрібні для існування розряду, створюються самим розрядом у процесі його розвитку без впливу зовнішнього іонізатора, то такий газовий розряд є *самостійним*. Напруга, при якій виникає самостійний розряд, називається *початковою напругою* газового розряду.

У роботі слід визначити форму електродів, які створюють однорідне при ( $K_n \leq 4$ ), або різко неоднорідне при ( $K_n > 4$ ) поля

$$K_n = E_{max} / E_{cp}, \quad (4.1)$$

де  $K_n$  – коефіцієнт неоднорідності електричного поля;  $E_{max}$ ,  $E_{cp}$  – максимальне й середнє значення напруженості електричного поля у повітряному проміжку.

В однорідному полі залежність величини розрядних напруг від довжини проміжку  $L$ , тиску  $p$  і температури  $T$  може бути отримана з умови існування самостійною розряду у вигляді

$$\alpha L = \ln \frac{1}{\gamma} = const, \quad (4.2)$$

де  $\alpha$  – число іонізаційних зіткнень;  $\gamma$  – коефіцієнт вторинної іонізації.



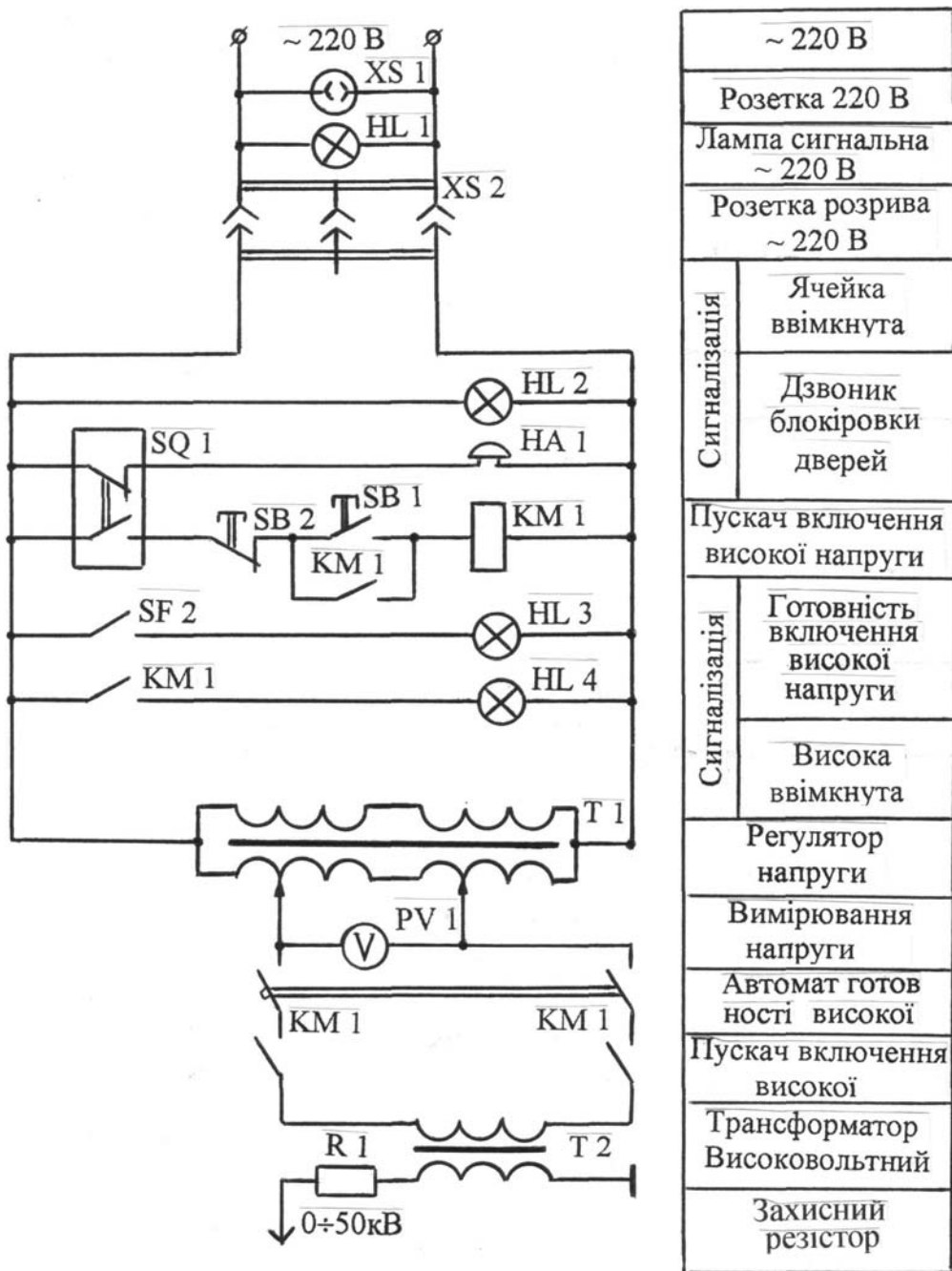


Рисунок 4.1 – Схема лабораторної установки № 3

Якщо визначити  $\alpha$  у вигляді  $\alpha = A \cdot \delta \cdot e^{-\frac{B \cdot \delta}{E}}$  і врахувати, що в однорідному полі  $E = U/L$ , то для величини розрядної напруги отримаємо формулу

$$U_p = \frac{B \cdot (\delta \cdot L)}{\ln \frac{A \cdot (\delta \cdot L)}{\ln \frac{1}{\gamma}}}, \quad (4.3)$$

де  $A, B$ , – коефіцієнти, що визначаються властивостями газу;  $\delta$  – густина газу:  $\delta = \frac{2,9 \cdot p}{276 + T}$ , ;  $p$  – тиск газу в кПа.

Формула (4.3) є аналітичним виразом закону *Пашена*, знайденого експериментально. Закон *Пашена* наголошує: при незмінній температурі розрядна напруга газу в проміжку з однорідним полем є функцією величини тиску  $p$  на відстань між електродами  $L$ . Тобто при незмінній відстані між електродами  $L$  розрядна напруга залежить від тиску, температури, вологості і характерові електричного поля.

Якщо провести апроксимацію виразу (4.3), можна отримати більш зручну формулу для розрахунку величини розрядних напруг:

$$U_p = 24,5 \cdot \delta \cdot L + 6,4\sqrt{\delta \cdot L}. \quad (4.4)$$

У різко неоднорідних полях при виконанні умов самостійного розряду поблизу стержневого електрода виникає корона. При цьому величина розрядної напруги може значно зменшуватись відносно початкової напруги в однорідному полі. Оскільки аналітичне визначення величини початкової і розрядної напруги в різко неоднорідних полях досить складне, його слід встановити експериментально, аналітично проаналізувати результати й зробити відповідні висновки.

### Послідовність виконання роботи

1. Ознайомитись з теоретичним матеріалом [1, 3].
2. Ознайомитись зі схемою лабораторної установки (рис.4.1) і вимогами ТВ при роботі на цій установці.
3. Ознайомитись з механізмом регулювання відстаней між електродами.
4. Дослідити залежність розрядної напруги  $U_p$  від форма електродів і відстані  $L$  між ними. Послідовність роботи така :
  - встановити вказану викладачем пару електродів на відповідній відстані між ними;
  - повільно підвищувати за допомогою регулятора напруги РНО напругу на електродах до моменту виникнення розряду;
  - занести в таблицю 4.1 показники вольтметра  $U_1$ ;
  - за допомогою градуювальної кривої випробувального трансформатора знайти амплітудне значення напруги на високовольтній стороні трансформатора і результати занести в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Протокол вимірювань

№ п/п	Форма електродів, наявність іонізатора	Вид напруги		Відстань між електродами $L$ , см					
				1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Куля- стержень (без іонізатора)	Напруга НН	$U_1$ , В						
		Розрядна напруга	$U_{2max}$ , кВ						
2	Площина- площина (без іонізатора)	Напруга НН	$U_1$ , В						
		Розрядна напруга	$U_{2max}$ , кВ						
3	Стержень- площина (без іонізатора)	Напруга НН	$U_1$ , В						
		Розрядна напруга	$U_{2max}$ , кВ						
4	Стержень з кільцем- площина (без іонізатора)	Напруга НН	$U_1$ , В						
		Розрядна напруга	$U_{2max}$ , кВ						
5	Площина- площина (з іонізатором)	Напруга НН	$U_1$ , В						
		Розрядна напруга	$U_{2max,К}$ В						
6	Стержень – площина (з іонізатором)	Напруга НН	$U_1$ , В						
		Розрядна напруга	$U_{2maxк}$ В,						

5. Ввімкнути іонізатор і повторити виміри за п.4 для другої і третьої пари електродів .

6. За отриманими даними на графіку зобразити залежність  $U_p$  від відстані  $L$  між електродами для всіх пар електродів.

### Зміст звіту

У звіті навести спрощену схему експерименту, таблицю з результатами вимірювань, графіки залежностей і сформулювати висновки по роботі з аналізом отриманих результатів.

## Контрольні запитання

1. Знайдіть аналітичні величини розрядних напруг для електродів «куля-куля», «куля-площина», дайте пояснення щодо розбіжності з експериментальними результатами.
2. У чому полягає механізм ударної іонізації?
3. Що таке лавинний і стримерний розряд?
4. Як впливає зовнішній іонізатор на величину розрядної напруги?
5. Дайте визначення і поясніть закон Пашена.
6. У чому полягає механізм автоелектронної та вторинної електронної емісії?
7. Поясніть особливості виникнення самостійного розряду в однорідних та неоднорідних електричних полях.
8. У чому полягає явище рекомбінації та його роль у процесі розвитку розряду?
9. Лавинна теорія розвитку розряду Таунсенда і стримерна теорія розряду.
10. Дайте визначення рухливості електронів і іонів, та їх аналітичний вираз.
11. Наведіть приклади застосування положень закону Пашена в ТВН.
12. Поясніть, чому із збільшенням тиску розрядна напруга зростає?
13. Поясніть, чому в вакуумі розрядна напруга вища ніж при нормальному тиску?
14. Який механізм виникнення розряду в абсолютному вакуумі?
15. Що таке термоелектронна емісія і механізм її виникнення.
16. Що таке критерій однорідності електричного поля?
17. Що таке краєвий ефект? Які поля є симетричними й несиметричними?
18. Наведіть аналітичний вираз і поясніть механізм розвитку лавини.
19. Що таке коефіцієнт ударної іонізації? Який його аналітичний вираз?
20. Що таке ефективний коефіцієнт ударної іонізації, від чого він залежить?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

### Дослідження функціональних характеристик апаратів захисту від перенапруг в електричних мережах

Мета роботи : ознайомлення з принципом координації ізоляції; конструкцією і принципом дії основних апаратів захисту від перенапруг в електричних мережах та дослідження їх експлуатаційних робочих характеристик.

## Основні теоретичні відомості

Призначення захисних апаратів полягає в тому, що вони унеможливають появу на електроустановках небезпечних для їх ізоляції перенапруг. Найпростішим захисним пристроєм від набігаючої по лінії перенапруг є іскровий захисний проміжок (ПЗ), який приєднується паралельно ізоляційній конструкції. Для попередження перекриття або пробою ізоляції вольтсекундна характеристика (ВСХ) захисного пристрою (рис. 5.1, крива 2) повинна бути розташована нижче ВСХ ізоляції установки (рис. 5.1, крива 1), тобто напруга пробою захисного апарату повинна бути меншою, ніж розрядна напруга ізоляції, яку він захищає. При цьому поява небезпечних для ізоляції електрообладнання перенапруг неможлива, оскільки при набігаючому імпульсі перенапруги  $U_n$  відбувається пробій ПЗ з наступним різким падінням («зрізом») напруги. Таким чином, принцип *координації* ізоляції полягає у погодженні робочих характеристик захисного апарату з параметрами електричної міцності ізоляції.

Після пробою ПЗ по його іонізованому проміжку протікає струм, обумовлений робочою напругою промислової частоти – який називається *супроводжувочим* струмом. Для електроустановки з глухозаземленою нейтраллю це відповідає однофазному короткому замиканню (КЗ). При роботі ПЗ одночасно на двох або трьох фазах дуга супроводжувочого струму може не погаснути і такий режим відповідає аварійному. Для запобігання цьому слід забезпечити гасіння дуги супроводжувочого струму за час, менший ніж час дії релейного захисту (за півперіоду промислової частоти). Обрив супроводжувочого струму при використанні ПЗ здійснюється за допомогою апаратів повторного ввімкнення (АПВ).

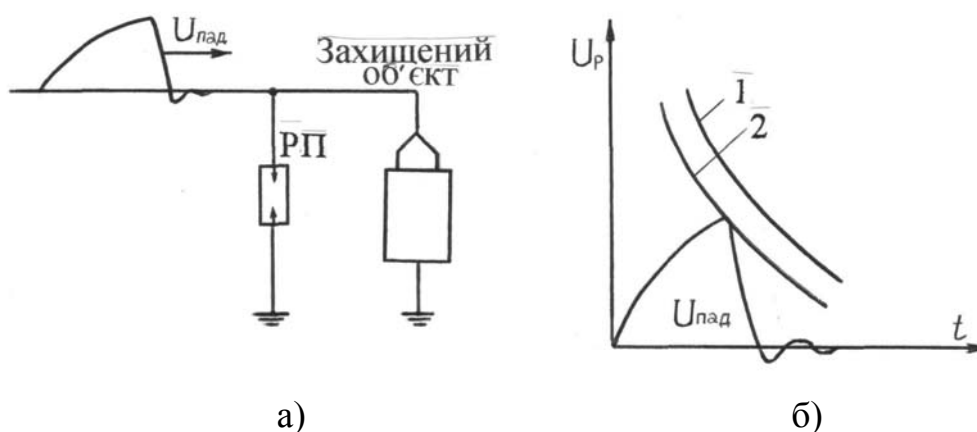


Рисунок 5.1 – Принцип дії захисного пристрою:  
а – схема підключення ПЗ; б – принцип координації ізоляції:  
1 – ВСХ ізоляції, 2 – ВСХ ПЗ

Захисні апарати, що забезпечують не тільки захист ізоляції від перенапружень, але й швидке гасіння дуги супроводжуючого струму, називають захисними розрядниками.

Використовують декілька способів гасіння дуги: у трубчатих розрядниках гасіння здійснюється за рахунок інтенсивного повздовжнього дуття інертного газу, що виділяється з пластмасового корпусу під дією високої температури дугового розряду; у вентильних розрядниках - завдяки зниженню величини супроводжуючого струму за допомогою нелінійного резистора, який включений послідовно з багаторазовим іскровим проміжком (ІП), який охолоджує дугу і виключає механізм термоіонізації.

У нелінійних обмежувачах перенапруг (ОПН) завдяки нелінійності резистора (варистора) супроводжуваний струм при робочій напрузі в мережі складає доли міліампера і дуга не може виникнути. Тому ОПН не мають іскрового проміжку і при робочій напрузі поведуть себе як звичайні опорні ізолятори. При появі перенапруги в точці приєднання ОПН його опір різко ( $\approx 10^6$  раз) зменшується і відправляє імпульс перенапруги в заземлюючий пристрій.

На рисунку 5.2 показаний приклад встановлення захисних апаратів на підстанції 100/10 кВ й вибору їх ВСХ відповідно до принципу координації ізоляції. Якщо на ВЛ 110 кВ внаслідок грозової діяльності утворився імпульс перенапруги, то падаючи на точку А – (місце встановлення трубчатого розрядника РТ1), він завдяки пробою ІП РТ1 перетворюється в імпульс з крутим фронтом ( $\alpha_2 > \alpha_1$ ), обмежений за амплітудою (імпульс 2). Останній в точці В встановлення розрядника РТ2 ще раз обмежується за амплітудою, чим забезпечується виконання умови координації ізоляції (імпульс 3):

$$U_{P\text{ РТ2}} < U_{P\text{ 50\%}} , \quad (5.1)$$

де  $U_{P\text{ РТ2}}$  – розрядна напруга РТ2,  $U_{P\text{ 50\%}}$  – п'ятидесятивідсоткова розрядна напруга ізоляції ВЛ 110 кВ.

ВСХ РВ 110 кВ повинна відповідати умові:  $U_{\text{ОСТ РВ 110}} < U_{P\text{ РТ2}}$ .

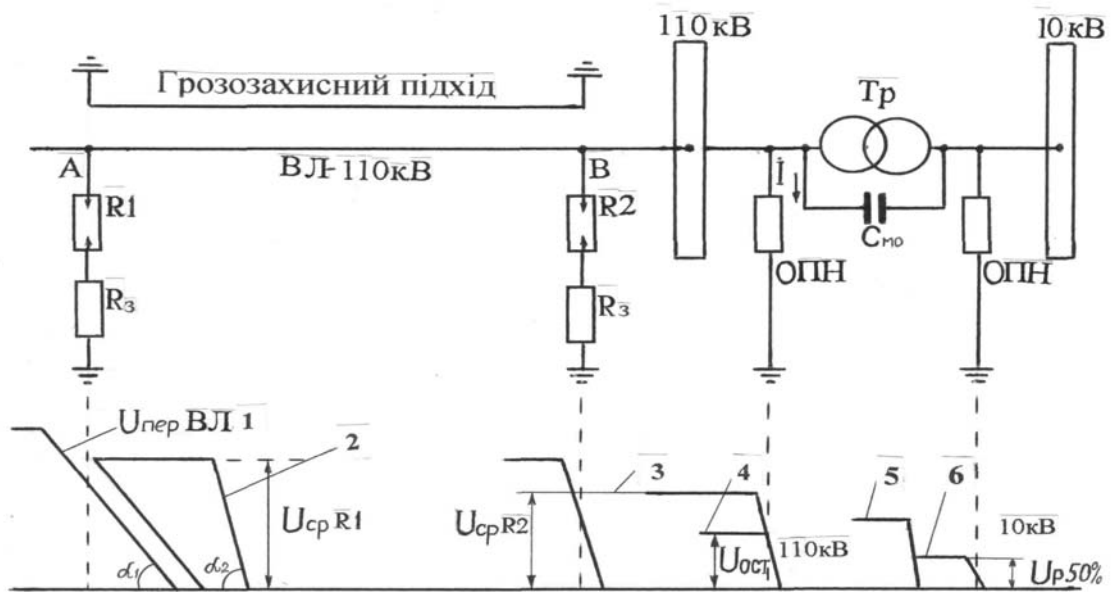


Рисунок 5.2 – Приклад встановлення захисних апаратів

У результаті після пробую РВ-110 кВ, утворюється імпульс 4 з достатньо пологим фронтом.

У випадку відмови РВ-110, якщо виконується умова (5.1), імпульс 3 не є небезпечним для ізоляції 110 кВ. При цьому по ємності міжобмоточної ізоляції проходить струм:

$$I = C \cdot \frac{dU_c}{dt} = aC, \quad (5.2)$$

де  $a = \frac{dU_M}{\tau_\phi}$  крутизна фронту;

$U_M$  – максимальна напруга імпульсу, кВ;

$\tau_\phi$  – тривалість фронту імпульсу, мкс;

$C$  – міжобмоточна ємність ізоляції.

Записуючи (5.2) з урахуванням закону Ома, отримаємо

$$U_M = I_{CMO} \cdot \tau_\phi / C. \quad (5.3)$$

Тут  $\tau_\phi / C$  – опір міжобмоточної ємності, який при крутому фронті малий, тому імпульс, переходячи на сторону 10 кВ (імпульс 5), може бути небезпечним для ізоляції 10 кВ. Це вимагає встановлення безпосередньо на шинах трансформатора 10 кВ вентильного розрядника РВ-10 за умов виконання співвідношення

$$U_{ост\ РВ10} < U_{РВ\ 50\ \% \ 10\ кВ} \quad (5.4)$$

Основні принципи захисту електрообладнання підстанцій від набігаючих хвиль перенапружень такі:

– необхідно виключити прямі удари блискавки поблизу (150–200 м) від основного об'єкта захисту (стержневі блискавковідводи, грозозахисні троси на підході до станції);

– для запобігання руйнуванню захисних апаратів електродинамічними силами струмів блискавки необхідно дискретно знижувати найбільшу амплітуду імпульсу перенапруження в такій послідовності: РТ-1, РТ-2, РВ-110, РВ-10 (рис. 5.2);

– обмежувати найбільшу величину імпульсу перенапруг після ввімкнення захисних апаратів малим імпульсним опором заземлення –  $R_{зг}$  (рис. 5.2).

### Послідовність виконання роботи

1. Ознайомитись з теоретичним матеріалом[1, 6].
2. Ознайомитись із схемою лабораторної установки і вимогами ТВ при роботі з нею.
3. Вивчити принцип дії та конструкцію захисних апаратів.
4. Перевірити початкові положення регулятора напруги і комутуючих апаратів.
5. За допомогою мегаомметра М2500 В виміряти опір ізоляції захисних апаратів і результати занести в таблицю 5.5.
6. Скласти схему для випробування об'єктів постійною напругою, ознайомитися з методикою вимірювання струмів витоку.
7. Збільшити напругу до нормативної величини і виміряти струм витоку. Отримані результати зіставити з нормативними значеннями і занести в таблицю 5.5.
8. Скласти схему для випробування об'єктів змінною напругою.
9. Підвищувати напругу до пробою III. Зіставити отримані дані величини напруги пробою з нормативними (табл. 5.1-5.4) і результати занести в таблицю 5.5.



Таблиця 5.1 – Електричні характеристики вентильних розрядників

Номинальна напруга розрядника, кВ	Група розрядника за ДСТУ	Тип розрядника	Напруга, кВ					
			Найбільше допустима	пробивна	імпульсна пробивна при часах 1,5—20 мкс	що залишається при імпульсному струмі з тривалістю фронту 8 мкс і амплітудою, кА		
						3	5	10
			Діюче значення		Максимальне значення, не більше			
3	I	РВТ, РВРД	3,8	7,5—9	7	7	8	9
	II	РВМ		7,5—9	8	9	9,5	11
	IV	РВП, РВО		9—11	20	13	14	-
6	I	РВТ, РВРД	7,6	15—18	14	14	16	18
	II	РВМ		15—18	15,5	17	18	20
	IV	РВП, РВО		16—19	32	25	27	-
10	I	РВТ	12,7	25—30	23,5	23,5	26,5	30,5
	II	РВМ		25—30	25,5	28	30	33
	IV	РВП, РВО		26—30,5	48	43	45	-
15	I	РВМ	19	31—36	50	38	41	46
	II	РВС		35—43	57	47	51	57
	III			38—48	67	57	61	67
20	I	РВМ	25	42—48	66	50	54	60
	II	РВС		47—56	74	62	67	74
	III			49—60,5	80	75	80	88
35	I	РВМ	40,5	73—84	108	80	87	98
	II	РВС		75—90	116	97	105	116
	III			78—98	125	122	130	143
110	I	РВТ	100	150—170	230	195	215	240
	II	РВМГ		170—195	260	245	265	295
	III	ТВС		200—250	285	315	335	367
50	I	РВТ	138	210—240	310	265	295	330
	II	РВМГ		230—265	370	340	370	410
	III	РВС		275—245	375	435	465	510
220	I	РВТ	200	300—340	445	390	430	480
	II	РВМГ		340—390	515	475	515	570
	III	РВС		400—500	530	630	670	734
330	I	РВТ	290	435—500	630	555	615	700
	II	РВМГ		485—560	740	660	725	800
500	I	РВТ	420	630—725	940	805	890	1010
	II	РВМГ		660—760	1070	985	1070	1180

Таблиця 5.2 –Значення опору вентильних розрядників (елементів розрядників)

Тип розрядника або елемента розрядника	Опір, МОм	
	не менше	не більше
1	2	3
РВМ-3	15	40
РВМ-6	100	250
РВМ-10	170	450
РВМ-15	600	2000
РВМ-20	1000	10000

## Продовження таблиці 5.2

1	2	3
Елементи розрядника РВМ-35:	600	2000
РВРД-3	95	200
РВРД-6	210	940
РВРД-10	770	5000
Елементи розрядника РВМЛ-66	250	1000
Елементи розрядників РВМА-220	400	2500
РВМГ-110М	400	2500
РВМГ-150М	400	2500
РВМГ-220М	400	2500
РВМГ-330М	400	2500
РВМГ-400, РВМГ-500	400	2500
Основний елемент розрядників РВМК-330, РВМК-500	150	500
Іскровий елемент розрядників РВМК-330, РВМК-500	300	1400
Основний елемент розрядника РВМК-400П	120	500
Іскровий елемент розрядника РВМК-400П	300	1400
Елемент розрядника РВМК-400В»‘	1500	7000
Елемент розрядника РВМК-750М	1300	7000
* Розрядник складається з двох елементів. Дані уточнюють для кожної партії розрядників.		

Таблиця 5.3 – Допустимі струми провідності вентиляльних розрядників і елементів розрядників

Тип розрядника або елемента розрядника	Значення випрямної напруги, при якій вимірюється струм провідності, кВ	Струм провідності, мкА, при температурі опору 20 °С	
		не менше	не більша
1	2	3	4
РВМ-3	4	380	450
РВМ-6	6	120	220
РВМ-10	10	200	280
РВМ-15	18	500	700
РВМ-20	24	500	700
РВС-15	16	200	340
РВС-20	20	200	340
РВС-35*’	32	200	340
РВС-15	16	450	620
РВС-20	20	450	620
РВС-29	28	450	620
РВС-33	32	450	620
РВС-35	32	450	620
РВРД-3	3	30	85
РВРД-6	6	30	85
РВРД-10	10	30	85
РВ-25	28	400	650
РВЕ-25М	28	400	650

## Продовження таблиці 5.3

1	2	3	4
РВМЕ-25	32	400	650
Елементи розрядників: РВМА-66, РВМА-220, РВМГ-110М, РВМГ-150М, РВМГ- 220М, РВМГ-330М, РВМГ-400, РВМГ-500	18	1000	1350
	30	1000	1350
	30	1000	1350
	30	1000	1350

Таблиця 5.4 – Допустимі значення струму провідності й найменші допустимі значення виміряного мегаметром опору обмежувача перенапруг (ОПН)

Тип обмежувача перенапруг	Найбільша робоча напруга (діюча), кВ	Діапазон допустимих значень струму провідності, виміряних при $U_{н.р.}$ під час випуску з підприємства - виготовлювача, мА	Значення випробної напруги промислової частоти, кВ	Діапазон допустимих значень струму провідності, виміряного від прикладеної напруги промислової частоти при введенні в експлуатацію	Значення струму провідності, діюче, мА, виміряне в експлуатації, при досягненні якого необхідно		Найменший допустимий опір ОПН, виміряний мегаметром 2,5 кВ, МОм
					ОПН зняти з експлуатації	вирішувати питання щодо заміни ОПН	
ОПН-	4,0	Не більше 05	4,0	0,5 і менше	Більше 0,5	-	2000
ОПН-	4,2	Не більше 0,5	4,2	0,5 і менше	Більше 0,5	-	2000
ОПН-	7,0	Не більше 0,5	7,0	0,5 і менш	Більше 0,5	-	5000
ОПН- П1-Е	7,2	-	7,2	±20 % від паспортного значення	Вище ±20 % від паспортного значення	-	~
ОПН-	12,0	-	12,0	Те саме	Те саме	-	-
ОПН-	18,0	-	18,0	„.	„.	-	-
ОПН-	24,0	-	24,0	„.	„.	-	-
ОПН-	40,5	-	40,5	„.	„.	-	-
ОПН-	40,5	0,5-0,3	40,5	0,5-0,8	1,2	1,0	3000
ОПН- 110.	73,0	0,4-0,65	73,0	0,4-0,65	1,2	1,0	3000
ОПН- 150.	100,0	0,5-0,8	100,0	0,5-0,8	1,5	1,2	3000
ОПН- 220.	146,0	0,6-0,9	100,0	0,35-0,55	1,8	1,4	3000
ОПН- 330.	210,0	1,1-1,5	100,0	0,5-0,8	3,0	2,4	3000
ОПН- 500	303,0	1,8-2,8	100,0	0,6-0,9	5,5(4,5)*	4,5(3,8)	3000
ОПН- 750	455,0	1,7-3,8	100,0	1,0-2,0	7,2	6,0	3000
ОПНО- 750	455,0	1,4-2,9	100,0	0,8-1,5	5,5	4,5	3000

\* У дужках наведено дані для ОПН-500ПН кожного елемента випуску після 1991 р.

10. Зробити висновок про придатність захисних апаратів до експлуатації й можливості включення їх у схему мережі.

Таблиця 5.5 – Протокол вимірювань

Опір захисних апаратів, МОм			Струм витoku при постійній напрузі, $I_{\text{вт}}$ , мкА			Напруга пробою III частотою 50 Гц, кВ	
Тип	Результат	Норма	$U_i$ , кВ	Результат	Норма	Результат	Норма

### Зміст звіту

У звіті навести схему проведених досліджень, ескізи захисних апаратів, протокол вимірювань (табл. 5.5), зробити висновок про придатність їх до експлуатації.

### Контрольні запитання

- Сформулювати основні принципи координації ізоляції за грозовим перенапруженням.
- Які основні функції захисних розрядників?
- Які існують типи захисних апаратів і їх принцип дії?
- У чому полягає перевага РВ над РТ і ПЗ, а ОПН перед РВ?
- У чому переваги й недоліки захисних проміжків?
- Що являє собою супроводжуючий струм та які способи його гасіння?
- У чому полягає в принцип дії вентильних розрядників?
- У чому полягає принцип дії ОПН?
- Назвіть параметри стандартних грозових випробувальних імпульсів і способи їх отримання.
- Назвіть параметри комутаційних імпульсів і способи їх отримання.
- Дайте визначення коефіцієнтів імпульсу та кумулятивності, їх впливу на величину випробувальної напруги.
- Які особливості методики випробування зовнішньої ізоляції?
- Конструкція і принцип дії випробувальних трансформаторів напруги.
- Конструкція та принцип дії випробувальних генераторів струму ГІС.
- Що таке «залишкова напруга» на захисному апараті?
- Як діє захищений підхід до ПС на амплітуду й крутизну імпульсів перенапруги?
- Як відбувається гасіння супроводжуючого струму в вентильному розряднику?
- Які недоліки мають розрядники типу РТ?
- Як визначається довжина захищеного підходу до підстанції?
- Що таке «хвильовий опір» лінії, як він впливає на параметри імпульсу перенапруги?
- Дайте визначення коефіцієнта відбиття і заломлення хвилі, що розповсюджується в лінії.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

### Контроль якості ізоляційних конструкцій за тангенсом кута діелектричних втрат

Мета роботи: вивчення механізму діелектричних втрат в ізоляції; засвоєння практичних методів вимірювання тангенса кута діелектричних втрат і ємності дослідних ізоляційних конструкцій.

#### Основні теоретичні відомості

В електричному полі відбувається поляризація діелектриків, яка полягає в тому, що центр негативного заряду електронів атома зміщується в бік позитивно зарядженого електрода, а позитивно заряджене ядро прагне до негативного електрода внаслідок чого утворюється *диполь* – нейтрально заряджена частинка, але орієнтована в напрямку зовнішнього електричного поля. Таку поляризацію називають електронною, або орієнтаційною, час її здійснення –  $10^{-15}$  с. Інший вид поляризації, яка називається міграційною, пов'язаний з переміщенням незв'язаних зарядів у середині діелектрика з однієї його ділянки в іншу і протікає за досить тривалий час, що складає декілька секунд.

Остання має практичне значення, оскільки проявляється в ізоляції конструкцій високої напруги, де використовують неоднорідні (комбіновані) діелектричні матеріали: порцеляна-масло-папір-повітря та ін. У реальній ізоляції завжди присутня деяка кількість домішок, які є джерелом носіїв заряду. В змінному електричному полі в діелектрику протікають струми провідності, які на схемі (рис. 6.1,б) позначені резистором, й струми зміщення, що позначені ємністю  $\Delta C$  (рис. 6.1) і проводячі домішки  $r$  протікають струми, що мають назву струмів абсорбції, пов'язані з неоднорідністю структури діелектрика. Крім того, через ізоляцію по каналах суцільної провідності протікає відносно малий струм провідності, або витоку:  $i_{np} = U/R_{np}$  ( $U$  – напруга, прикладена до діелектрика).

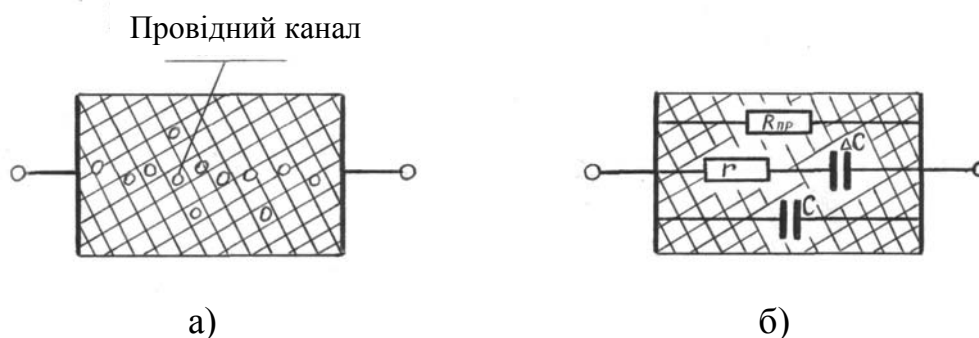


Рисунок 6.1– Реальна ізоляція:

а – присутні домішки; б – схема заміщення ізоляції

Протікання поляризаційних струмів призводить до розігріву діелектрика, в результаті чого електрична енергія перетворюється в тепло. Такі втрати електроенергії мають назву *діелектричних втрат* і виникають в основному за рахунок явища міграційної поляризації.

При змінній напрузі через ізоляцію протікає активний струм:

$$I_a = U \cdot \left( \frac{1}{R} + \omega \Delta C \cdot \frac{\omega T}{1 + \omega^2 T^2} \right), \quad (6.1)$$

а також ємнісний (поляризаційний) струм:

$$I_c = U \cdot \left( \omega C_\infty + \omega \Delta C \frac{1}{1 + \omega^2 T^2} \right). \quad (6.2)$$

Тут  $T=r\Delta C$  постійна часу;  $\omega$  – кутова частота (314 рад/с при  $f=50$  Гц).

На рисунку 6.2 зображена еквівалентна схема заміщення діелектрика і векторна діаграма її струмів, з яких виходить, що

$$\operatorname{tg} \delta = I_a / I_c. \quad (6.3)$$

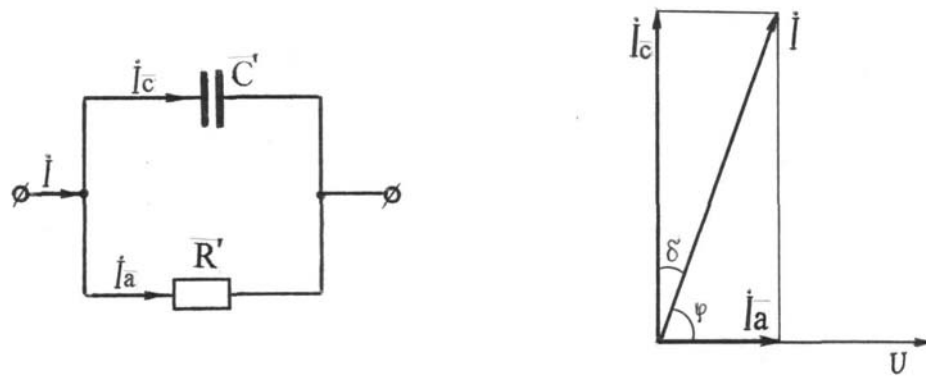


Рисунок 6.2 – Еквівалентна схема заміщення діелектрика і векторна діаграма струмів через діелектрик

Втрати електроенергії в ізоляції дорівнюють:

$$p = U \cdot I_c \cdot \operatorname{tg} \delta = \omega C U^2 \cdot \operatorname{tg} \delta = U \cdot I_a. \quad (6.4)$$

Фізичну інтерпретацію  $\operatorname{tg} \delta$  можна провести, виходячи з того, що реальний діелектрик характеризується переважно діелектричними властивостями, які визначаються ємністю  $C'$ :

$$C' = C + \Delta C \frac{1}{1 + \omega^2 T^2} \quad (6.5)$$

і провідністю  $\gamma'$ :

$$\gamma' = \frac{1}{R'} = \frac{1}{R_{np}} + \omega \Delta C \frac{\omega T}{1 + \omega^2 T^2}. \quad (6.6)$$

Доля провідникових властивостей діелектрика  $I_a$  може бути визначена з пропорції, якщо струм  $I_c$ , який визначає основні його діелектричні властивості прийняти за одиницю:  $I_a - x; I_c - 1$ .

Звідси випливає, що  $\operatorname{tg} \delta = I_a / I_c$ , що вказує на долю провідникових властивостей діелектрика, якщо його діелектричні властивості прийняти за одиницю.

Таким чином,  $\operatorname{tg} \delta$  є найважливішою характеристикою електричної ізоляції, оскільки від її величини залежить, насамперед, потужність діелектричних втрат (6.4) і, відповідно, температурний режим роботи ізоляції, а також напруга теплового пробою і режим теплового старіння ізоляції.

Величина  $\operatorname{tg} \delta$  дуже чутлива до зміни якості ізоляції, і при її погіршенні спостерігається значне зростання питомої провідності  $\gamma$ , а значить і величини  $\operatorname{tg} \delta$ . Отже за величиною  $\operatorname{tg} \delta$  можна зробити висновок про наявність в ізоляції забруднень або вологи.

На практиці для вимірювання  $\operatorname{tg} \delta$  і ємності ізоляції використовують міст змінного струму типу МД-І6 (міст Шерінга), який дає змогу проводити виміри за нормальною схемою, коли обидва електрода ізолювані від землі, або за перевернутою схемою, коли один з електродів об'єкта заземлений (рис. 6.3).

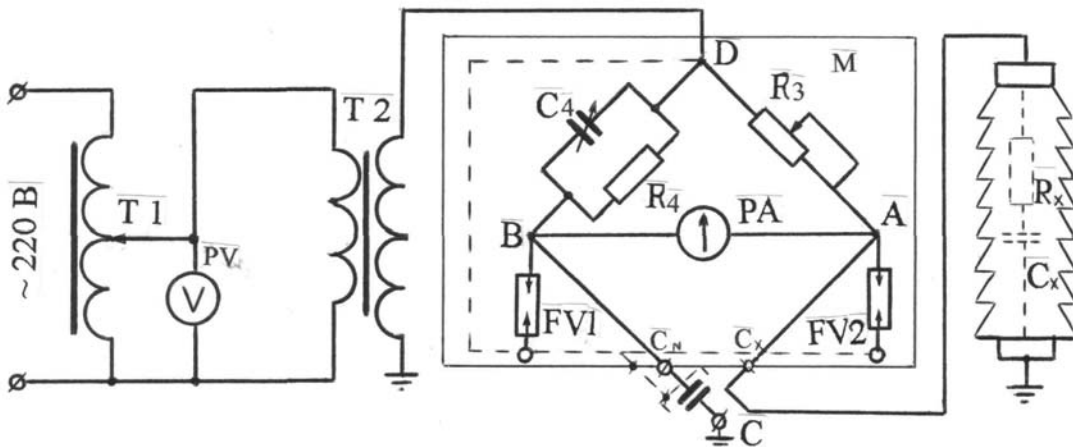


Рисунок 6.3 – Схема вимірювання  $\operatorname{tg} \delta$  ізоляції за допомогою моста змінного струму типу МД-І6 (міст Шерінга)

Нормальну схему вимірювання використовують в лабораторних умовах, а також при контролі міжфазної ізоляції машин і кабелів.

Перевернуту схему включення моста використовують при вимірюванні ізоляційних характеристик стаціонарного обладнання, де один з електродів переважно заземлений.

Оскільки робоча напруга моста дорівнює 5-10 кВ, для безпеки в роботі при нормальній схемі й захисту вимірювальних приладів застосовують розрядники *FV*.

Еталонний конденсатор  $C_N$  має один високовольтний (ВВ) і два низьковольтних НВ і Э виводи. Останні мають відносно слабку ізоляцію по відношенню до металевого корпусу конденсатора, тому для підсилення ізоляції вводів НВ та Э корпус еталонного конденсатора встановлюють на ізоляторах.

Індикатором рівноваги моста є вібраційний гальванометр РА, який реагує на струм 0,1 мкА. Для запобігання пошкоджень гальванометра забороняється включення - вимкнення випробувального трансформатора (И-50 або НОМ-10) і різкого збільшення напруги при максимальній чутливості гальванометра.

Якщо ємнісний струм об'єкта при номінальній напрузі перевищує 0,1 А, треба приєднувати шунт у плече  $R_3$  моста, що здійснюється за допомогою перемикача шунтів плеча  $R_3$ , які відповідають наступним значенням струмів і опору  $n$  шунта (табл. 6.1).

Таблиця 6.1 – Результати вимірювань

Положення шунта	1	2	3	4	5
Допустимий ємнісний струм, А	0, 01	0,025	0,06	0,15	1,2
Опір шунта $n$ , Ом	100+ R	60	25	10	4

Розрахунок ємності об'єкта здійснюють за формулою

$$C_x = C_N R_4 \frac{100 + R_3}{n R_3}. \quad (6.5)$$

Величину  $\text{tg} \delta$  відраховують за показаннями плеча  $C_4$  і розраховують за формулою

$$\text{tg} \delta = \omega \cdot C_4 \cdot R_4 = 10^6 \cdot C_4,$$

оскільки для моста підбирають співвідношення  $\omega \cdot R_4 = 10^6$ .

### Послідовність виконання роботи

1. Ознайомитись з теоретичним матеріалом за [1, 6].
2. Ознайомитись зі схемою лабораторної установки (рис. 3.1) і вимогами ТБ при роботі з нею.
3. Перевірити початкове положення регулятора напруги та комутаційних апаратів, встановити показник чутливості моста в нульове положення.



4. Скласти нормальну або перевернуту схему моста (за рекомендацією викладача) згідно з рисунку 6.3 і приєднати об'єкт, що підлягає дослідженню.

Слід пам'ятати, що провід  $C_N$  в перевернутій схемі повинен бути додатково ізолюваний від землі, оскільки він знаходиться під високою напругою, а його особиста ізоляція слабка.

5. Ввімкнути живлення схеми і трансформатора і подати на міст напругу 10 кВ.

6. Здійснити врівноваження моста плечами  $R_3$  і  $C_4$ , проводячи вимірювання величини  $\text{tg}\delta$  та  $R_3$ . Результати занести в таблицю 6.2.

7. Розрахувати величину ємності об'єкта  $C_x$ , пФ за формулою (6.5) і результати занести в таблицю 6.2. Співставити отримані результати із стандартною ємністю.

### Зміст звіту

У звіті навести схему мосту змінного струму типу МД-16, таблицю з результатами досліджень, результати розрахунків, сформулювати висновки по отриманим результатам дослідження.

Таблиця 6.2 – Протокол випробувань

Назва об'єкта			
Заводська ємність			
Величина опору $R_3$ , Ом			
$\text{tg}\delta$ , %			
Розрахована величина ємності, пФ			

### Контрольні запитання

1. Наведіть схему заміщення ізоляції і поясніть значення її елементів.
2. Побудуйте векторну діаграму струмів для паралельної схеми заміщення ізоляції і поясніть фізичний зміст  $\text{tg}\delta$ .
3. Наведіть конструкцію, призначення і принцип дії моста МД-16.
4. В яких випадках застосовують нормальну і перевернуту схему включення моста для вимірювання  $\text{tg}\delta$ ?
5. З якої причини може спостерігатись різке зростання  $\text{tg}\delta$  при випробуванні ізоляції підвищеною напругою?
6. Визначте величину опору об'єкта в МОм за результатам вимірювань.
7. Які існують види поляризації діелектриків та їх роль в визначенні діелектричних втрат в ізоляції?

8. Яка природа електропровідності діелектричних матеріалів, методи її контролю та запобігання?
9. Поясніть природу міграційної поляризації, наведіть співвідношення, що показують можливість контролю якості за параметрами  $R$  і  $C$ .
10. Яка природа абсорбційних явищ в діелектриках і їх роль у визначенні діелектричних втрат?
11. З чого складаються діелектричні втрати, які методи їх контролю та запобігання?
12. Фізичний зміст параметра  $\text{tg}\delta$ , його роль у визначенні величини діелектричних втрат.
13. Поясніть суть методу контролю ізоляції «опір – час» і спосіб його реалізації.
14. Поясніть суть методу контролю ізоляції «ємність – частота» і спосіб його реалізації.
15. Поясніть механізм впливу температури на величину  $\text{tg}\delta$ ?
16. Яка природа електронної та іонної поляризації?
17. Які переваги та недоліки прямої й «перевернутої» схеми мосту Шеренга?
18. Як впливає частота робочої напруги на величину  $\text{tg}\delta$ ?
19. Чим відрізняються орієнтаційна поляризація від міграційної?
20. Поясніть механізм діелектричних втрат та як їх розраховують?

## **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7**

### **Дослідження механізму розвитку ковзних електричних розрядів по поверхні твердого діелектрика**

Мета роботи: вивчення електродинамічних процесів розвитку електричного розряду по поверхні діелектрика; експериментальне дослідження залежності величини розрядної напруги від характеру електричного поля, що утворюється електродами різної форми, від характеристик матеріалу діелектрика, геометричних параметрів та властивостей його поверхні.

### **Основні теоретичні відомості**

Усі конструкції ізоляторів можна звести до трьох характерних моделей, які зображені на рисунку 7.1.

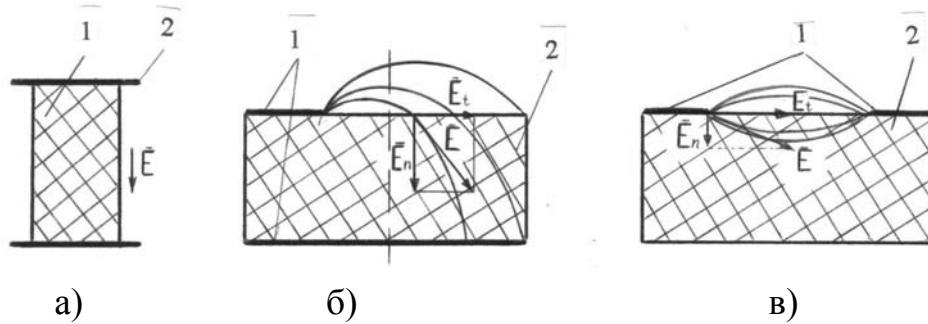


Рисунок 7.1 – Характерні моделі конструкцій ізоляторів з твердим діелектриком:

*1 – електроди; 2 – діелектрик*

На рисунку 7.1,а показано розміщення діелектрика в однорідному електричному полі. Поверхня розподілу діелектрика і повітря розташовані вздовж силових ліній електричного поля.

На рисунку 7.1,б,в – показано розташування діелектрика в ізоляторах з неоднорідним полем. На рисунку 7.1,б тангенційна складова напруженості поля  $E_t$  набагато менша за нормальну складову, а у випадку 7.1,в – навпаки.

У діелектрику, який знаходиться в однорідному електричному полі, розряд відбувається завжди по його поверхні, завдяки волозі, адсорбованій з оточуючого повітря. Певну роль у розвитку поверхневого або ковзного розряду мають забруднення поверхні діелектрики, а також мікрозазори між діелектриком і електродом. Під впливом сильного електричного поля молекули води розпадаються (дисоціюють) на позитивні і негативні іони, що переміщуються до відповідних електродів. У результаті напруженість поля поблизу електродів зростає, а в середині проміжку послаблюється, що призводить до зменшення величини розрядної напруги. У гігроскопічних діелектриків (скло, бакеліт) це зниження більше, ніж у малогігроскопічних (порцеляна). Зменшення розрядної напруги при наявності мікрозазорів або мікротріщин пов'язано з різницею діелектричної проникності  $\epsilon_0$  повітря і твердого діелектрика  $\epsilon$ , внаслідок чого в них збільшується напруженість електричного поля та інтенсифікуються іонізаційні процеси. У результаті електрони і іони потрапляють до міжелектродного проміжку, де створюють локальне підвищення напруженості поля, що призводить до зменшення електричної міцності цього проміжку.

У реальних ізоляторах твердий діелектрик майже завжди знаходиться у неоднорідному електричному полі, тому варіант конструкції, зображений на рисунку 7.1,а, на практиці не зустрічається.

У конструкціях на рисунку 7.1,б,в – поле неоднорідне, тому при достатній напрузі в них виникає коронний розряд, що має вигляд смуги неяскового

світіння. При подальшому збільшенні напруги ділянка коронування розширюється і з'являються багаточисельні канали світіння, що мають назву *стримерних* розрядів. Канали стримерів в ізоляційних конструкціях зі значною нормальною складовою напруженості електричного поля мають набагато більшу ємність відносно внутрішньою електрода (рис. 7.1,в), ніж у конструкціях з переважно тангенційною складовою поля. Внаслідок цього через них проходить досить значний струм, достатній для термічної іонізації каналу розряду. У результаті опір каналу різко зменшується, інтенсивність світіння зростає і виникають так звані *ковзні розряди*. Оскільки провідність каналу ковзного розряду значно більша провідності каналу стримера, падіння напруги на ньому незначне, тому вся напруга прикладена до неперекритої частини діелектрика. У результаті довжина ковзного розряду збільшується і процес закінчується повним перекриттям ізолятора. Очевидно, чим більша поверхнева ємність ізолятора, тим нижча розрядна напруга при постійній довжині ковзного розряду  $L_k$ .

Конструкція ізолятора на рисунку 7.1,б характерна для опорних ізоляторів, а на рисунку 7.1,в – для прохідних. У даному випадку гігроскопічність поверхні діелектрика мало впливає на величину розрядної напруги, оскільки основна роль в її зниженні належить неоднорідному електричному полю.

Таким чином, величина напруги поверхневого розряду на частоті 50 Гц визначається довжиною ковзного розряду  $L_k$ , станом поверхні діелектрика та його властивостями, конфігурацією електричного поля, температурою, тиском та вологістю повітря. Для приблизних розрахунків напруженостей поверхневого розряду при нормальних умовах можна використовувати такі емпіричні співвідношення:

– напруга початку розвитку ковзних розрядів при наявності нормальної складової електричного поля (формула Ротта);

$$U_k = \frac{1,36}{C_n} 10^{-4}, \text{ кВ}, \quad (7.1)$$

де  $C_n$  – питома поверхнева ємність (ємність одиниці поверхні), на якій розвивається розряд по відношенню до протилежного електрода,  $\Phi/\text{см}^2$ ;

– для плоского діелектрика величина питомої поверхневої ємності:

$$C_{II} = \epsilon_0 \epsilon_r / \Delta, \text{ Ф/см}^2, \quad (7.2)$$

– для полого циліндричного діелектрика:

$$C = 2\epsilon_0 \epsilon_r / D \ln \frac{D}{d}, \text{ Ф/см}^2, \quad (7.3)$$

де  $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-14}$   $\Phi/\text{см}$  – діелектрична постійна;  $\epsilon_r$  – відносна діелектрична проникність ( $\epsilon_r = 5,7$  для скла і кераміки,  $\epsilon_r = 5,3$  – для склопластика і бакеліта);

$\Delta, D, d$  – розміри ізолятора на рисунку 7.2.

Залежність розрядної напруги  $U_p$  від довжини ковзних розрядів для випадку на рисунку 7.1,б має вигляд

$$U_p = U_k + 12,8 L_k, \text{ кВ}, \quad (7.4)$$

– для плоского діелектрика:

$$U_p = 13 * I_k^{0,5} L^a, \text{ кВ}, \quad (7.5)$$

– для циліндричного діелектрика:

$$U_p = 13 * I_k^{0,5} N^b, \text{ кВ}, \quad (7.6)$$

де  $L$  та  $N$  – параметри, що визначаються з формул

$$L = \Delta / \epsilon_r; \quad N = \frac{D * \ln D / d}{\epsilon_r}, \quad (7.7)$$

$a, b$  – показники ступені, що визначаються експериментально.

У лабораторній роботі досліджуються плоский та циліндричний діелектрик (рис. 7.2).

### Послідовність виконання роботи

1. Ознайомитись з теоретичним матеріалом [1,4].
2. Ознайомитися зі схемою лабораторної установки та вимогами ТБ при роботі з нею.
3. Ознайомитись з дослідними зразками та об'єктами випробувань.
4. Дослідити залежність напруг  $U_k$ ,  $U_{кр}$  та  $U_p$  від товщини плоского діелектрика  $\Delta$ . Результати занести в таблицю 7.1

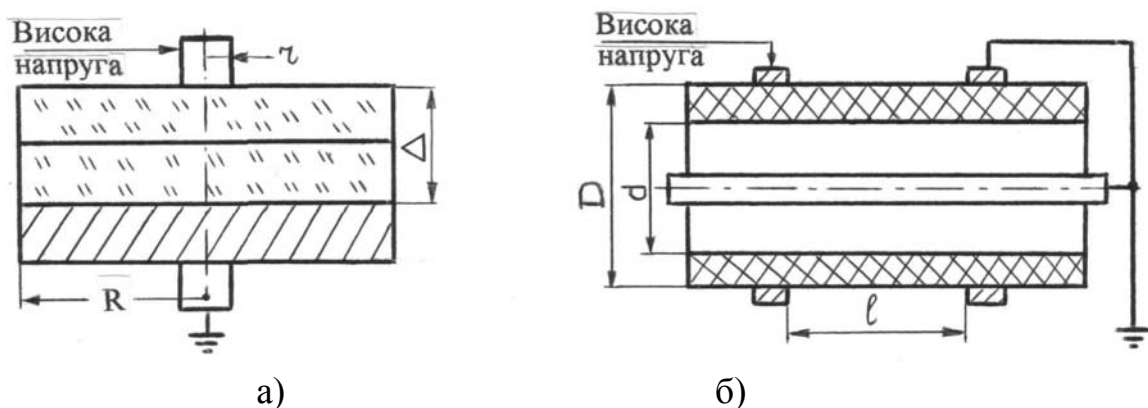


Рисунок 7.2 а – Схема дослідження плоского діелектрика;  
б – дослідження циліндричного діелектрика

5. Дослідити залежність напруг  $U_k$ ,  $U_{кр}$  та  $U_p$  від відстані  $L$  між електродами циліндричного діелектрика без внутрішнього електрода. Результати занести в таблицю 7.2.

6. Дослідити залежність напруг  $U_k$ ,  $U_{кр}$  та  $U_p$  від відстані  $L$  між електродами циліндричного діелектрика з внутрішнім електродом. Результати занести в таблицю 7.2.

7. За отриманими даними побудувати графіки залежності  $U_k$ ,  $U_{кр}$  та  $U_p$  від товщини  $\Delta$  або відстані  $L$  для кожного досліджуваного об'єкта.

Таблиця 7.1 – Протокол дослідження плоского діелектрика

$\Delta = \underline{\hspace{2cm}}$ , см	$R = \underline{\hspace{2cm}}$ , см	Товщина діелектрика $\Delta$ , см					
Напруга появи корони, В	$U_{K1}$ $U_{K2}$ $U_{K3}$ $U_{Kcp}$						
Напруга появи ковзних розрядів, В	$U_{KP1}$ $U_{KP2}$ $U_{KP3}$ $U_{KPcp}$  $U_{KP}$						
Розрахункова величина, кВ	$U_{P1}$						
Розрядна напруга, В	$U_{P2}$ $U_{P3}$ $U_{Pcp}$  $U_P$						
Розрахункова величина, кВ							

Таблиця 7.2 – Протокол випробувань циліндричного діелектрика без внутрішнього електрода і з внутрішнім електродом

D= _____ см	d=см	Відстань між електродами L, см					
		Без внутрішнього електрода			з внутрішнім електродом		
		1	2	3	1	2	3
Напруга появи корони, кВ							
Напруга появи ков-зних розрядів, кВ							
Розрахункова величина, кВ							
Розрядна напруга, кВ							
Розрахункова величина, кВ							

### Зміст звіту

У звіті навести рисунок 7.2, таблиці протоколів досліджень, результати розрахунків, графіки отриманих залежностей та їх аналіз, сформулювати висновки по роботі.

### Контрольні запитання

1. Від чого залежить величина розрядної напруги по поверхні плоского діелектрика в однорідному полі, чистій, сухій поверхні?
2. Як залежить величина виникнення ковзних розрядів при умовах великої і малої ємності поверхні діелектрика відносно одного з електродів?
3. Який вплив на величину розрядної напруги має металевий заземлений стержень в середині труби ? Який фізичний механізм його впливу?
4. Які умови сприяють появі дугового розряду по поверхні діелектрика?
5. Чи будуть виникати ковзні розряди при постійній напрузі?
6. У чому полягає механізм розвитку розряду по поверхні діелектрика?
7. Як впливає конструкція ізоляторів на величину їх електричної міцності ? Яка роль нормальної і тангенціальної складових напруженості електричного поля ?

8. Поясніть механізм розвитку розряду по поверхні діелектрика, наведіть аналітичний вираз існуючої залежності параметрів розряду (формула Теплера).
9. Проаналізуйте вплив атмосферних факторів на величину електричної міцності ізоляції.
10. Які особливості випробування внутрішньої та зовнішньої ізоляції?
11. Наведіть класифікацію захисних апаратів та області їх застосування.
12. Як визначається 50% сухо- й мокро розрядна напруга?
13. Поясніть теорію «місточкового» пробую поверхні ізолятора.
14. Як впливають геометричні параметри ізолятора на величину розрядної напруги?
15. Які особливості розвитку поверхневого (ковзного ) розряду при дії комутаційних та грозових імпульсів?
16. Назвіть заходи запобігання перебиття поверхні ізолятора.
17. Що таке довжина шляху витoku, і як вона впливає на величину розрядної напруги?
18. Як зміниться поверхнева розрядна напруга, якщо збільшити діелектричну проникність ізоляції?
19. Як впливає частота на величину поверхневої розрядної напруги?
20. Поясніть механізм втрат від коронного розряду. Коли втрати більші – при постійній і змінній напрузі?



## Список рекомендованої літератури

1. Рой В. Ф. Техніка високих напруг : навч. посіб. / В. Ф. Рой. – Харків : ХНУМГ , 2012. – 145 с.
2. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Техніка високих напруг» (для студентів 4 курсу денної форми навчання) / [Уклад. : В. Ф. Рой, Д. В. Румянцев]. – Харків: ХНУМГ 2008. – 55 с.
3. Базуткин В. В. Техника высоких напряжений: навч. посіб./ В. В. Базуткин, В. П. Ларионов. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 463 с.
4. Ларионов В. П. Техника высоких напряжений: навч. посіб. / В. П. Ларионов, В. В. Базуткин – Москва : Энергия, 1982. – 455 с.
5. Степанчук К. Ф. Техника высоких напряжений: навч. посіб. / К. Ф. Степанчук. – Минск: Выш. шк., 1992. – 365 с.
6. Долгинов Л. И. Техника высоких напряжений : навч. посіб. / Л. И. Долгинов. – Москва : Энергия, 1986. – 464 с.
7. Лабораторные работы по технике высоких напряжений : навч. посіб. / [М. А. Арсенов та ін.]. – Москва : Энергия, 1982. – 68 с.

*Навчальне видання*

Методичні вказівки  
до виконання лабораторних робіт  
з навчальної дисципліни

**«ТЕХНІКА ВИСОКИХ НАПРУГ»**

*(для студентів 4 курсу денної форми навчання напряму підготовки  
6.050701 – Електротехніка та електротехнології спеціальності,  
7.05070103 – Електротехнічні системи електроспоживання)*

Укладачі **РОЙ** Віктор Федорович,  
**РУМЯНЦЕВ** Дмитро Валерійович

Відповідальний за випуск *П. П. Рожков*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2016, поз. 491 М

---

Підп. до друку 7.04.2016

Друк на ризографі

Зак. №

Формат 60x84/16.

Ум.-друк. арк. 3,4

Тираж 50 пр.

Виконавець і виготовлювач  
Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002  
Електронна адреса: [rektorat@kname.edu.ua](mailto:rektorat@kname.edu.ua)  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК 4705 від 28.03.2014 р.