

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

До виконання лабораторних робіт

« Техніка високих напруг »

Галузь знань G3 «Інженерія, виробництво та будівництво»

Спеціальність G3 (141)– Електрична інженерія

Освітня програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

«Інжиніринг електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами»

УДК: 342.9.07, 351, 349.231

У методичних вказівках висвітлено вимоги до техніки безпеки, порядок організації та проведення лабораторних робіт, сформовано мету, завдання. Викладений теоретичний матеріал охоплює мету курсового проекту, основні теоретичні положення та порядок виконання і оформлення роботи. Для перевірки теоретичного матеріалу, в кінці кожної роботи приведені контрольні питання, які дозволяють перевірити теоретичні знання студентів. Наведений у методичних вказівках теоретичний матеріал охоплює питання організації та розрахунку блискозахистної споруди, що є частиною курсу «Техніка високих напруг», що у повній мірі відповідає вимогам щодо підготовки студентів зі спеціальності (141) G3 «Електрична інженерія».

Рекомендовано Вченою радою ННІ Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка НУБіП України (протокол № від « » 2026 р.)

Рецензенти: к.т.н., доцент О. Ю. Синявський гарант освітньої програми

к.т.н., доцент Макаревич С.С. гарант освітньої програми

Укладачі: В. Є. Кривонос В.Є., Прокопенко С.О.

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Техніка високих напруг

Відповідальний за випуск професор В. Є. Кривонос

Підписано до друку Формат 60x84 1/16.

Ум. друк. арк. Обл.-вид. арк.

Наклад пр. Зам. №

Зміст

Вступ.....	4
Лабораторна робота № 1. ВИМІРЮВАННЯ ОПОРУ ІЗОЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРОУСТАНОВ.....	10
Лабораторна робота 2. НАБУТТЯ НАВВИКІВ РОБОТИ З ЛАБОРАТОРНИЙ УСТАНОВИ АИ-70.....	27
Лабораторна робота № 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ ПОВІТРЯНИХ ПРОМІЖКІВ НАПРУГО. ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	31
Лабораторна робота № 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ ПОВІТРЯ ПРИ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРИЧНОГО РОЗРЯДУ ПО ПОВЕРХНІ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ НАПРУГОЮ ЗМІННОГО СТРУМУ.....	45
Лабораторна робота № 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ ПОВІТРЯ ПРИ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРИЧНОГО РОЗРЯДУ ПО ПОВЕРХНІ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ НАПРУГОЮ ЗМІННОГО СТРУМУ.....	50
Лабораторна робота № 6. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ ПОВІТРЯ ПРИ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРИЧНОГО РОЗРЯДУ ПО ПОВЕРХНІ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ НАПРУГОЮ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	63
Лабораторна робота № 7. ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ НАПРУГИ ПО ГІРЛЯНДІ ІЗОЛЯТОРІВ.....	69
Лабораторна робота № 8. ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ ПОВІТРЯНИХ ПРОМІЖКІВ.....	78
лабораторна робота №9. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗОН ЗАХИСТУ СТЕРЖНЕВИХ БЛИСКАВКОВІДВОДІВ.....	89
Список використаної літератури	

ВСТУП

Ці методичні вказівки складено для проведення циклу лабораторних робіт з дисципліни «Техніка та електрофізика високих напруг» для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр» напряму підготовки 6.050701 – «Електротехніка та електротехнології».

Лабораторні роботи проводяться в лабораторії «Техніка високих напруг» кафедри електропостачання ім. В. М. Синькова. Вони дають можливість студентам, що вивчають курс, перевірити та дослідити теорію, яку подано в навчальних посібниках та лекціях.

ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТІВ З ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Звіт з кожної виконаної студентом лабораторної роботи повинен бути оформлений згідно «Положення про порядок підготовки, оформлення та видання навчальної літератури» СУ СМЯ НУБіП України 7.5 – 072 - 003 та відповідати наступним вимогам:

1. Звіт повинен бути підписаний студентом і обов'язково містити в собі:
 - назву та мету лабораторної роботи;
 - експериментальні дані, отримані студентом під час виконання лабораторної роботи;
 - результати розрахунків, отримані студентом самостійно;
 - графічні залежності, побудовані студентом самостійно;
 - висновки по роботі.

2. Розрахунок кожної невідомої величини треба спочатку виконати в загальному вигляді, а потім в отриману формулу підставити числові значення. В остаточному результаті розрахунку мають бути вказані одиниці виміру.

3. При побудові графіків, кривих та діаграм необхідно вибирати такий масштаб, щоб 1 см осі координат (або одна масштабна одиниця) відповідав $1 \cdot 10^{\pm n}$, $2 \cdot 10^{\pm n}$ чи $5 \cdot 10^{\pm n}$ одиниць виміру фізичної величини, де n – ціле число. Градування кожної координатної осі виконувати з нуля, рівномірно, через 1 чи 2 см (1 чи 2 масштабні одиниці). Числові значення координат точок, за якими будуються криві, не наводити. Весь графік в цілому та окремі криві повинні мати назви.

Курс лабораторних робіт з дисципліни «Техніка високих напруг» призначений для студентів денної і заочної форм навчання .

Включає набір лабораторних робіт з основних практичних питань техніки високих напруг. Вони є діючими моделями реальних пристроїв в робочих умовах. Кожна має необхідне технічне забезпечення.

Припускає знання теоретичного матеріалу по темах, основних властивостей досліджуваних пристроїв і методів досліджень фізичних об'єктів.

Виконання робіт вимагає суворого додержання правил технічної експлуатації обладнання та правил техніки безпеки при роботі з електричним обладнанням.

ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО БЕЗПЕКИ

Електробезпека є важливим додатком ТВН і основною умовою практичної роботи з устаткуванням. Вона регламентується правилами, що діють, визначають необхідні заходи технічні і організаційні. Проблема безпеки в електричних установках ділиться на два великі розділи: техніку безпеки і техніку експлуатації. Техніка безпеки (ТБ) переважно направлена на персонал і організацію його безпечної і ефективною роботи в процесі експлуатації устаткування. Техніка експлуатації (ТЕ) покликана забезпечити ефективну

роботу устаткування в процесі його експлуатації. Відповідно до цього існує і два розділи правив: ПТЕ і ПТБ. Існують особливості правив для споживачів і електростанцій, безпосередньо пов'язані з особливостями живлення електричних схем.

Структура правил виділяє установки до 1000 В і вище 1000 В. Саме вказане розподілення визначає організаційну специфіку необхідних заходів, виділяє їх основні і додаткові компоненти.

Визначальними умовами допуску до робіт в діючих електричних установках є: відповідна кваліфікація, інструктаж на робочому місці, наряд або розпорядження.

Організаційна основа проведення робіт в діючих електричних установках - бригадний метод робіт, перерв і ін. Всі роботи виконуються за участю допускаючого і відповідального виконавця. При цьому кожен член бригади несе персональну відповідальність за стан техніки безпеки.

Необхідно також враховувати, фізичні, психологічні, медичні й інші засади роботи в електричних установках.

Фізичні основи ТВН

В дисципліні «Техніка високих напруг» буде проводитись детальне ознайомлення:

- електрофізичні процеси в діелектричних середовищах при дії сильних електричних полів ;
- блискавка та блискавкозахист;
- перенапруги в високовольтних електричних мережах та заходи захисту від їх дії ;
- високовольтна ізоляція та ізоляційні конструкції ;
- діагностування стану високовольтної ізоляції ;
- високовольтні випробувальні установки та вимірювання .

Техніка безпеки при вивченні ТВН заснована на обліку дії основних шкідливих чинників, що виникають при необережних діях персоналу в електроустановках, що діють.

Серед них: напруга, опір, струм. Розглянемо властивості і вплив цих основних діючих чинників.

Струм. Небезпечним для здоров'я людини вважається значення струму в 1 мА. При цьому можуть виникнути спонтанні порушення основних життєвих процесів: дихання і серцевої діяльності.

Опір. Опір людини величина істотно нелінійна, суттєво залежить від її стану (здорова, хвора, бадьора, пасивна, розслаблена тощо), психоемоційних чинників (настрою, цілеспрямованості, мотивації) і т. д. Таких чинників велика кількість. Вважається, що опір бадьорої, здорової, тверезої, цілеспрямованої... людини складає величину близько 20 – 80 кОм.

У структурному відношенні, – це переважно опір верхніх шарів шкіри. Тому шкіра має бути сухою. Все інше в організмі людини з погляду електричної – провідник. Причому провідник електролітичний.

Проте основна нелінійність такого опору безпосередньо пов'язана з часом дії напруги. Тому в правилах записано, що необхідно щонайшвидше звільнити людину, що потрапила під напругу, дотримуючи особисті запобіжні засоби.

Напруга. Небезпечна напруга, згідно закону Ома – це похідна від вказаних величин з істотною обмовкою або обліком ще одного важливого чинника – зовнішнього (навколишніх умов).

Для приміщень тих, що не містять чинники підвищеної небезпеки прийняті значення змінної напруги 36 (48 В) до ~110 У.

Для приміщень тих, що містять чинники підвищеної небезпеки (провідний пил, підвищена вологість, температура і ін.) допустима напруга 12 В.

Відносно постійної напруги, воно до 110 У воно також не представляє великої небезпеки в звичайних умовах.

При цьому будь-які жарти з будь-якою напругою в діючих електричних установках, безпосередньо загрожують кримінальною відповідальністю. Це

необхідно запам'ятати раз і назавжди. Необережність, неуважність й помилки можуть бути також фатальні.

Медичні основи ТБ

В більшості випадків статистика паралічів серця (4/5) від дії струму стверджує асистолітичні стани, за яких життєві процеси запускаються непрямим масажем. Ці навички також необхідні персоналу електроустановок і є предметом правил.

Відомо також, що струм 100 мА за 3 с. викликає фібриляцію – безладне сипання волокон серцевих м'язів, порушується синхронність роботи м'язів серця й параліч органу. У такій ситуації допомагає тільки високовольтний розряд реанімаційного терапевтичного приладу – дефібрилятора.

Проте правила в будь-якому випадку за відсутності дихання й пульсу вимагають робити штучне дихання та непрямий масаж серця до приїзду **швидкої допомоги**. Але для цього перш за все необхідна вірна діагностика, інакше подібна реанімація здатна вбити.

Психологічна основа ТБ

Психологічною основою ТБ є достатня стійкість психіки до зовнішніх подразників, її моторика, особливо в критично ситуаціях. Це вимагає вироблення відповідних якостей особи. Схильність до паніки, надмірної цікавості, відсутність стримуючих реакцій здатні не тільки зіграти злий жарт, але при нагоді стати причиною важких поразок.

Організованість, обережність і увага у поєднанні із відповідними знаннями є вірною запорукою успіху при практичному освоєнні ТВН.

Загальні вимоги до виконання робіт

Перед виконанням лабораторних робіт студенти проходять інструктаж з техніки безпеки розподіляються по бригадах та робочих місцях. Робочі місця закріплені за кожною бригадою. Студенти зобов'язані знати і виконувати правила техніки безпеки і правила внутрішнього розпорядку в навчальних

лабораторіях. Під час роботи бути уважними й дисциплінованими.

Початкові дані для виконання кожної роботи вказуються викладачем.

До роботи допускаються тільки теоретично підготовлені студенти за наявності підготовлених звітів. Звіти по лабораторних роботах можуть виконуватися в окремому зошиті.

Структура звіту по лабораторній роботі включає:

1 номер лабораторної роботи; 2 тема; 3 мета; 4 короткий опис об'єкту дослідження; 5 схема експерименту; 6 дані експерименту; 7 результати обробки даних; 8 висновки.

Лабораторні роботи виконуються на діючому електричному обладнанні.

Лабораторна робота № 1

Вимірювання опору ізоляції електроустановок

Мета роботи: Освоєння методики контролю стану ізоляції.

1. 1. Короткі теоретичні відомості

Опір ізоляції обмоток вимірюється відносно корпусу електричної машини та між обмотками. Вимірювання здійснюється мегомметром, який є малопотужним генератором постійного струму. Випускаються мегомметри класу напруги 500, 1000 та 2500 В. Крім того, промисловість також випускає електронні мегомметри типу Ф4101 на напругу 100, 500 та 1000 В.

Згідно з вимогами вимірювання опору ізоляції електричних машин, які обертаються, потрібно виконувати мегомметрами класу 500 В, якщо напруга обмотки до 500 В включно, і мегомметрами класу не нижче 1000 В, якщо номінальна напруга обмотки вища 500 В. Для вимірювання опору ізоляції обмоток трансформаторів використовуються мегомметри класу 1000 В для трансформаторів до 35 кВ і потужністю менше 16 МВА та класу 2500 В для інших трансформаторів.

Під час вимірювання опору ізоляції обмоток великих електричних машин та трансформаторів, які мають значну ємність (між обмотками та на корпус), потрібно використовувати електронні мегомметри або мегомметри з моторним приводом, оскільки час перехідного процесу, що визначається величиною ємності, може сягати декількох хвилин. Запис опору ізоляції потрібно виконувати двічі: через 15 та 60 с після появи напруги на обмотках. Вимірювання опору ізоляції здійснюється як в практично холодному, так і в нагрітому стані за температури обмоток, яка наближена до робочої, а також до й після випробувань ізоляції обмоток на електричну міцність. В результаті вимірювань, крім опору ізоляції, який відповідає вимірюванню через 60 с (R_{60^*}), визначають коефіцієнт абсорбції:

$$K_{a6} = \frac{R_{60''}}{R_{15''}}$$

Опір ізоляції відносно корпусу машини та між фазами потрібно вимірювати по чергово для кожного кола, яке має окремі виводи, за електричного з'єднання усіх інших кіл з корпусом машини. Після закінчення вимірювань опорів ізоляції кожного кола потрібно їх розрядити шляхом з'єднання з заземленим корпусом машини. Тривалість такого з'єднання для машин з обмотками на номінальну напругу 3000 В та вище складає 15 с або 1 хв для машин потужністю до 1 МВт чи більше 1 МВт, відповідно. Під час використання мегомметра (*megohm meter; high-resistance ohmmeter*) класу 2500 В тривалість з'єднання обмоток з корпусом складає не менше 3 хв.

Під час вимірювання опору ізоляції обмоток електричних машин відносно корпусу (рисунок 2.2, а) нульовий вивід мегомметра з'єднується з заземленим корпусом машини (через болт заземлення), а високовольтний вивід – з одним із виводів обмотки. Обмотки фаз, опір яких не вимірюється, заземлюються. При вимірюванні опору ізоляції між обмотками (рисунок 2.2, б) порядок приєднання виводів мегомметра до виводів обмотки будь-який. Аналогічна схема використовується для вимірювання опору ізоляції трансформаторів.

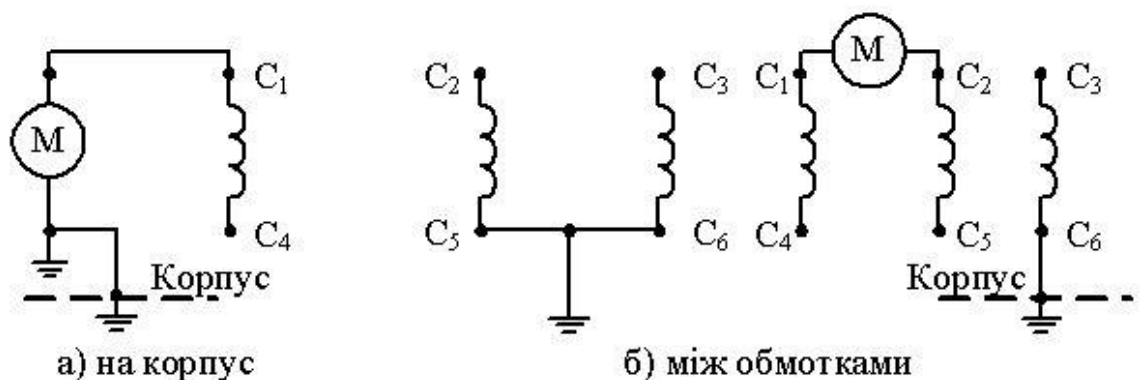


Рисунок 2.2 – Схеми вимірювання опору ізоляції обмоток електричних машин

Значення опору ізоляції обмоток (в МОм) для робочої температури t повинно бути не менше від значення, яке визначене за формулою:

$$r = \frac{U}{1000 + 0,01 \cdot P},$$

де U – номінальна напруга обмотки, В;

P – номінальна потужність (*rated power*) машини, кВА або кВт.

Якщо значення опору ізоляції, яке отримане за допомогою формули (2.8), не перевищує 0,5 МОм, то як мінімально допустиме приймаємо $r = 0,5$ МОм.

Оскільки вимірювання опору ізоляції при робочій температурі дуже складне, допускається проведення вимірювань за більш низької температури. У цьому випадку мінімально допустимий опір ізоляції для температури $t < t_{\text{роб}}$ потрібно визначати за формулою:

$$r_v = r_{\text{min}} \cdot 2^K,$$

де $K = \frac{t_{\text{роб}} - t}{20}$ з округленням до більшого цілого;

r_{min} – мінімально допустимий опір ізоляції визначений за формулою (2.8), але не менший 0,5 МОм.

Приклад. Визначимо мінімально допустимий опір ізоляції обмотки статора (*stator*) асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором типу 4АН280М2У3 потужністю 200 кВт, напругою 660 В, класом нагрівостійкості ізоляції обмотки ротора F. Вимірювання опору ізоляції здійснюється за температури 20°C.

Визначимо за формулою (2.8) мінімально допустимий опір ізоляції для робочої температури (для класу нагрівостійкості F розрахункова температура складає 115°C):

$$r_{\min} = \frac{660}{1000 + 0,01 \cdot 200} = 0,66 \text{ МОм.}$$

Визначимо мінімально допустимий опір ізоляції для температури 20°C:

$$K = \frac{115 - 20}{20} = 4,75 \approx 5.$$

$$r_{20^\circ\text{C}} = 0,66 \cdot 2^5 = 21,12 \text{ МОм.}$$

Отже, опір ізоляції асинхронного двигуна за температури 20°C повинен бути не менше 21,12 МОм.

Випробування ізоляції обмоток електричних машин на електричну міцність проводять для визначення кількісного показника електричної міцності ізоляції обмоток відносно корпусу машини, між обмотками та між вітками фаз. Випробування ізоляції обмоток відносно корпусу машини та між фазами проводять змінною напругою частотою 50 Гц від випробувального трансформатора потужністю не менше 1 кВ×А на 1 кВ напруги випробування.

Регулювання напруги здійснюється плавно або ступенями, які не перевищують 5% від випробувального значення, на стороні первинної обмотки випробувального трансформатора. Випробування починають з напруги не вищої від 1/3 випробувальної. Час підвищення напруги від половинного значення до випробувального має бути не менше 10 с; випробувальна напруга витримується протягом 1 хв. Після цього напруга плавно знижується до 1/3 від випробувальної та вимикається живлення трансформатора.

Принципова схема установки для випробувань наведена на рисунку 1.1. Основною частиною установки є випробувальний високовольтний трансформатор 7, який отримує живлення від мережі через автотрансформатор для регулювання напруги 6. Автотрансформатор дозволяє плавно піднімати напругу від нуля на первинній обмотці трансформатора 7 і тим самим напругу на обмотці, яка випробовується. Під час пробою ізоляції збільшується струм в обмотках трансформатора 7. Для його обмеження використовується захисний

опір 8. Вважається, що ізоляція пройшла випробування, якщо не виникло її пробою або перекриття ковзними розрядами.

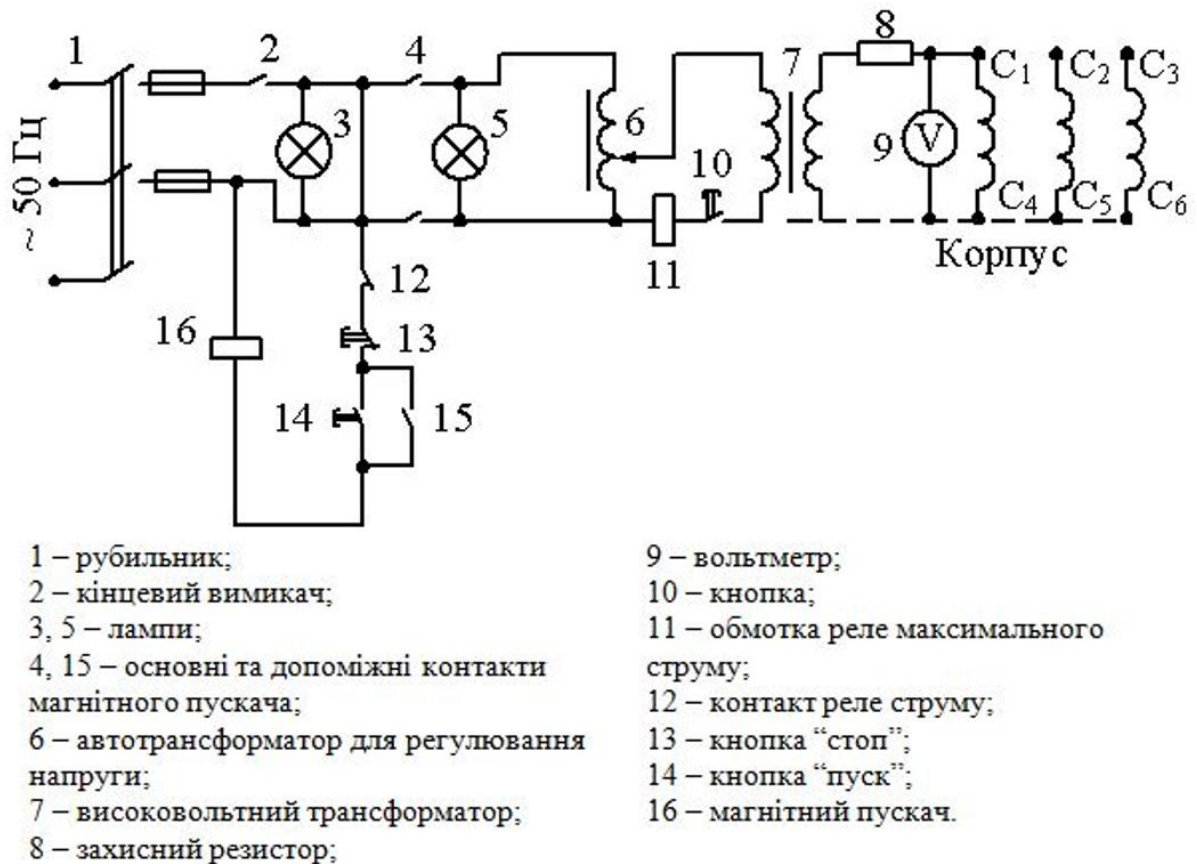


Рисунок 1.1 Принципова схема установки для випробувань ізоляції

Для гарантування безпеки роботи високовольтний трансформатор, електрична машина, що випробовується, та всі струмоведучі частини, які знаходяться під час випробувань під високим потенціалом, захищені металевим заземленим огороженням. На дверях огороження встановлено кінцевий вимикач 2 з контактом, який розмикається під час відкривання дверей та вимикає установку з мережі. Увімкнення установки можливе тільки з зачиненими дверима захисної конструкції й здійснюється рубильником 1. При цьому вмикається лампа 3, яка освітлює табло “Установка увімкнена” над дверима огорожі.

Після натискання кнопки “Пуск” 14 обмотка магнітного пускача 16 вмикається під напругу та замикаються його основні контакти 4, які підключають до мережі автотрансформатор 6. Одночасно з основними

контактами замикається й допоміжний контакт 15, який засвічує на пульті червоний сигнал “Висока напруга подана”. Це означає, що під час натискання кнопки 10 висока напруга може бути подана на електричну машину, яка випробовується. Для ввімкнення високовольтного трансформатора цю кнопку потрібно натиснути й утримувати рукою.

Випробувальний трансформатор (*test(ing) transformer*) приєднується до автотрансформатора через реле максимального струму, яке вимикає високовольтний трансформатор у момент пробою ізоляції обмотки машини, що випробовується. У момент пробою контакт 12 цього реле розмикається, коло управління магнітним пускачем залишається без живлення, всі контакти пускача розмикаються, гасне лампа 5 і автотрансформатор з випробувальним трансформатором вимикається з мережі. Контроль за значенням випробувальної напруги здійснюється за допомогою високовольтного вольтметра 9, який розташований за огорожею. Після закінчення випробувань вимикають рубильник 1 (напругу перед цим знижують до нуля), відчиняють двері огорожі, заземлюють вивід C_1 для розряду конденсатора “обмотка-корпус” та складають наступну схему.

Випробуванню ізоляції на електричну міцність відносно корпусу потрібно піддавати по черзі кожне коло, яке має окремі виводи. При цьому один вивід випробувального трансформатора 7 під’єднують до будь-якого з виводів обмотки, що випробовується (на рисунку 2.3 до виводу C_1), а інший вивід заземлюють та під’єднують до заземленого корпусу машини, з яким під час випробування обмотки $C_1 - C_4$ електрично з’єднують обмотки $C_2 - C_5$ та $C_3 - C_6$.

Випробування ізоляції обмотки суміжних витків двигуна, який працює на холостому ході, проводиться напругою $1,3 \cdot U_{ном}$ протягом 3 хв. Для гідрогенераторів ізоляція обмотки (*primary insulation*) суміжних витків повинна випробовуватись напругою $1,5 \cdot U_{ном}$ протягом 5 хв, для

турбогенераторів напругою $1,3 \cdot U_{ном}$ – протягом 5 хв. Потрібне значення випробувальної напруги генераторів досягається збільшенням струму збудження. Під час випробувань машин постійного струму з кількістю полюсів більше чотирьох, напруга між суміжними колекторними пластинами не повинна перевищувати 24 В.

Функціональний стан ізоляції відображається її опором. Опір ізоляції є однією з основних характеристик будь-якого електричного устаткування. Є робочим критерієм її стану й готовності електричного устаткування до подачі напруги.

$$R_{із} = U/I_{вт},$$

де $I_{вт}$ – струм витоку діелектрика.

Вимірюється на постійній напрузі і змінюється в часі унаслідок абсорбції, геометричної місткості і провідності, рис. 1. 2.

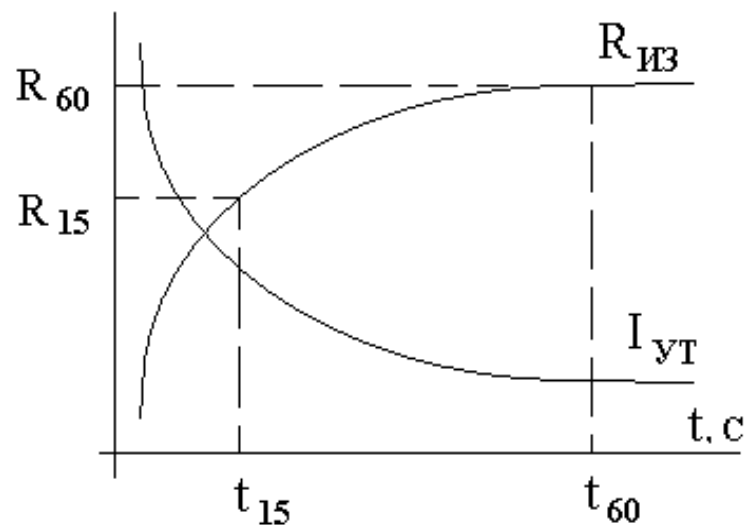


Рис. 1. 2. Зміна струму витоку і опору ізоляції в часі.

Вимірюється у відключеному стані електричної установки мегаомметром.

Мегомметр (мегомметр) призначений для вимірювання опору ізоляції електричної проводів, кабелів, роз'ємів, трансформаторів, обмоток електричних машин і інших пристроїв, а також для вимірювання поверхневих

і об'ємних опорів ізоляційних матеріалів, що не знаходяться під напругою, при температурі навколишнього повітря від мінус 30 до плюс 40 °С і відносній вологості до 90% при температурі плюс 30 °С. Загальний вигляд та основні елементи приладу наведено на рис. 1.3.

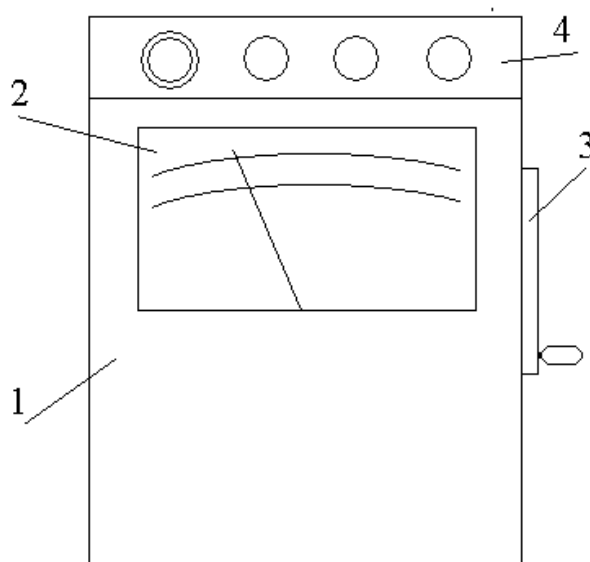


Рисунок 1. 3. Основні елементи приладу:

1 – корпус, 2. – індикатор, 3 – привід генератора. 4 – затиски контактні.

Контактна панель приладу надає можливості необхідних для вимірювання з'єднань, рис. 1. 4.

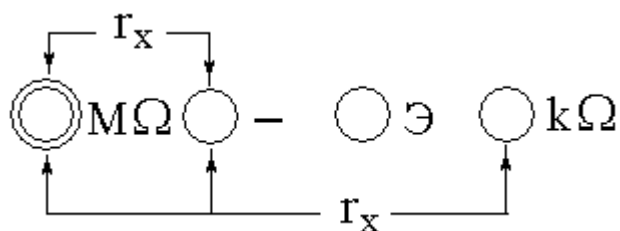


Рисунок 1. 4. Вигляд й з'єднання контактної панелі:

«MΩ» – контакт кратності мега; «-» – загальний контакт;

«Э» – екран (земля); «кΩ» – контакт кратности кіло.

На контактній панелі наведені дві основні вимірювальні схеми, відповідні межах вимірів: MΩ й кΩ. Кожному інтервалу вимірів відповідає своя

градуйована шкала вимірювального індикатора. Основні позначення шкали індикатора приведені, рис. 1. 5..

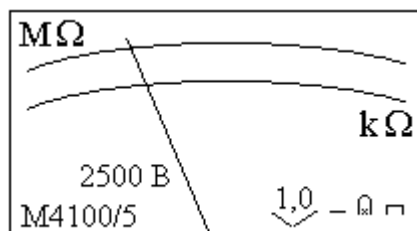


Рис. 1.5. Вимірювальний індикатор приладу

Слід зважати, що градуювання шкал зустрічне.

Принцип дії мегомметра заснований на вимірюванні величини падіння напруги на вимірюваному опорі при проходженні через нього оперативного струму заданої величини. Призначений для вимірювання опору постійному струму.

1. 2. Опис лабораторної установки

Мегомметр M4100 є вимірювальним приладом баластного типу з вбудованим джерелом напруги.

Мегомметр M4100 є двохграничним переносним приладом і призначений для вимірювання опору ізоляції знеструмлених електричних ланцюгів. Випускається в п'яти модифікаціях по вихідній напрузі і найбільшому значенню вимірюваного опору, табл. 1. 1.:

Таблиця 1. 1. Вимірювана напруга.

Напруга. В	Опор МОм
100	100
250	300
500	500
1000	1000
2500	3000

Мегомметр призначений для експлуатації при температурі навколишнього повітря від мінус 30 до +40°C і відносній вологості до 90% при температурі +30°C. Прилади тропічного виконання призначені для роботи в умовах тропічного клімату при температурі навколишнього повітря від мінус 10 до +45°C і відносній вологості 98% при температурі +35°C.

Основні технічні характеристики.

Межі вимірювання опору, робоча частина шкали і величина номінальної напруги на затисках приладу приведені в таблиці 1. 2..

Таблиця 1. 2. Основні технічні характеристики приладів.

Модифікація приладу	Межі вимірювання		Робоча частина шкали		Номінальна вихідна напруга, В
	кОм	МОм	кОм	МОм	
М4100/1	0—200	0—100	0—200	0—20	100+10
М4100/2	0—500	0—300	0—500	0—50	250+25
М4100/3	0—1000	0—500	0—1000	0—100	500+50
М4100/4	0—1000	0—1000	0—1000	0—200	1000+100
М4100/5	0—2000	0—3000	0—2000	0—1000	2500+250

Основна погрішність вимірювань не перевищує 1 % від довжини робочої частини шкали.

1. Час заспокоєння рухомої системи – не більше 4 с.
2. Живлення приладу здійснюється від вбудованого генератора, що приводиться в обертання рукою.
3. Довжина шкали – не менше 80 мм.
4. Прилад витримує транспортне трясіння з прискоренням 50 м/с² при частоті ударів від 80 до 120 за хв.
5. Конструктивного виконання корпусу приладу – бризкозахищене.

6. Габаритні розміри: не більше 200x155x140 мм

7. Маса: не більше 3,5 кг

8. По основних технічних характеристиках, прилад відповідає вимогам ГОСТ 8038-60 «Омметр. Технічні вимоги».

Побудова й принцип роботи.

Прилад змонтований в пластмасовому корпусі. Генератор, випрямляч і вимірник розміщені усередині корпусу. Зверху корпус закритий кришкою, на якій розташовані контактні затиски і вимірювальний прилад.

Принципова схема приладу

Схема складається з генератора змінного струму G , що приводиться в обертання рукою, випрямляча, вимірювального механізму $И$ (логометра магнітоелектричної системи), додаткових резисторів, рис. 1. 6..

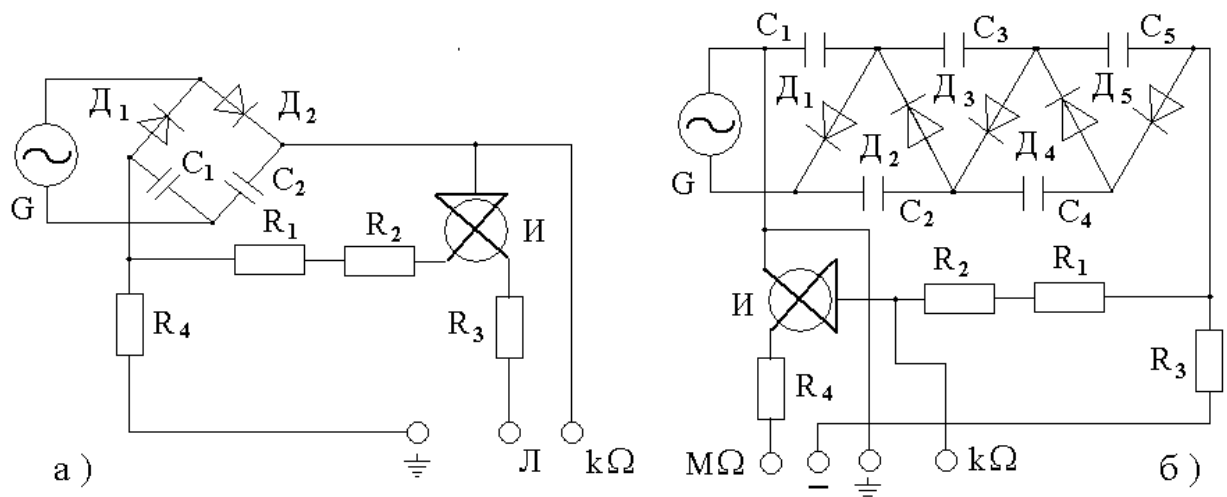


Рисунок 1. 6. Схема електрична принципова:
а) – трьох контактна; б) – чотирьох контактна.

Основу схеми складають: генератор змінного струму, випрямляч — помножувач напруги, вимірник. Конструкція генератора мегомметра показана на рис. 1. 7.

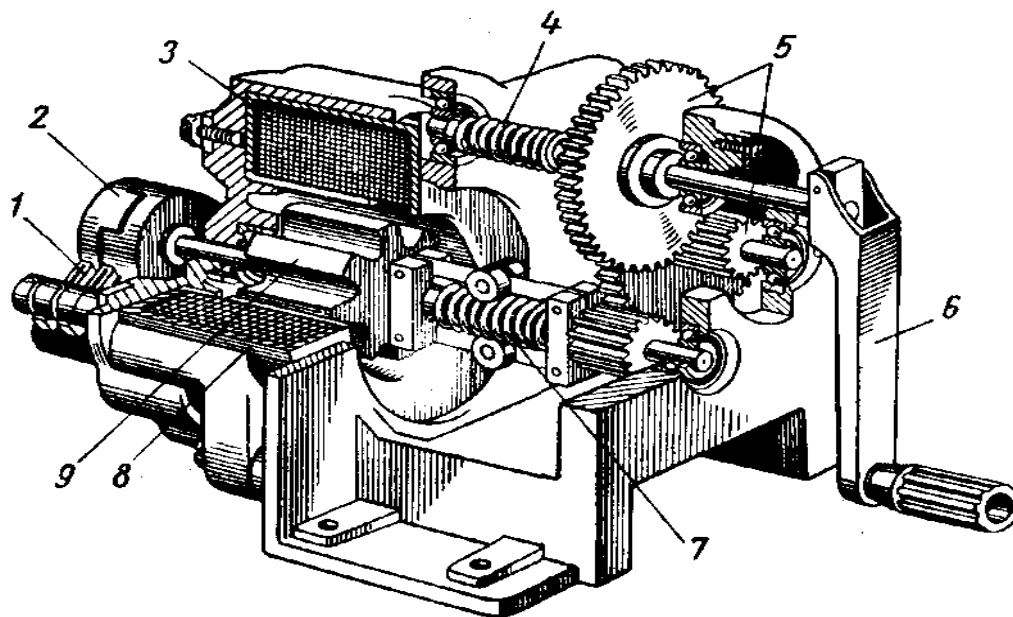


Рисунок. 1. 7. Конструкція генератора мегомметра: 1 – щітки, 2 – колектор, котушка статора, 4 – пружина розчеплення зворотного ходу, 5 – зубчата передача, 6 – ручка приводу, 7 – відцентровий регулятор швидкості, 8 – магнітопровід статора, 9 – ротор.

Джерелом живлення схеми є генератор змінного струму незалежного збудження з постійними магнітами і регулятором оборотів.

У схемі, рис. 1. 6 а генератор підключений до схеми подвоєння напруги, що складається з елементів D_1 і D_2 , C_1 і C_2 , включених в діагоналях моста. Робота цієї схеми півперіодна, заснована на почерговому заряді ємностей C_1 і C_2 , напруга яких складається і через вимірювальну рамку логометра I прикладаються до навантаження, — вимірюваному об'єкту.

У схемі, рис. 1. 6. б генератор підключений до схеми помножувача напруги, що складається з елементів D_1 , D_2 , D_3 , D_4 і D_5 ; C_1 , C_2 , C_3 , C_4 і C_5 . Робота цієї схеми півперіодна, заснована на почерговому заряді ємностей і підвищенні напруги, що додається до вимірюваного об'єкту через вимірника I , що вимірює струми витоку. Обмежуючі резистори $R_1 - R_4$ формують межі вимірювання.

Якір генератора досягає номінального числа оборотів при обертанні рукоятки приладу із швидкістю 120 об/хв. На валу якоря генератора

розміщений відцентровий регулятор, що забезпечує постійність напруги при збільшенні швидкості обертання якоря генератора вище номінальної.

При вимірюванні опору ізоляції на межі «МΩ» вимірюваний опір підключається до затисків «Л» (лінія) – «позначення землі» (земля) (Э). Постійний струм від випрямляча протікає через рамки (робочу і протидіючу) вимірювального механізму, додаткові резистори і вимірюваний опір ізоляції. Залежно від величини вимірюваного опору ізоляції, протікаючий струм в ланцюзі робочої рамки змінюватиметься, що викличе відхилення рухомої частини, на кут, відповідний вимірюваному опору. Через протидіючу рамку логометра протікає постійний струм, що створює протидіючий момент.

При вимірюванні на межі «кΩ» необхідно перемичку, що є на одному із сполучних дротів, під'єднати до затисків «позначення землі» (Э) – «Л», а вимірюваний опір – між затисками «позначення землі» (Э) – «кΩ».

Вихідна напруга приладу залежить від величини вимірюваного опору. Із збільшенням вимірюваного опору шунтуючий вплив ланцюга робочої рамки зменшується, і напруга на вимірюваному опорі наближається до номінальної.

Вказівки заходів безпеки

Увага! Не приступати до вимірювань, не переконавшись у відсутності напруги на об'єкті, що перевіряється!

Перед початком вимірювань на час підключення приладу до випробовуваного ланцюга остання тимчасово заземляється для розряду місткості.

Зважаючи на високу напругу на виході приладу в процесі вимірювання не торкатися до сполучних елементів об'єкту, що перевіряється.

Підготовка приладу до роботи

Для перевірки справності' приладу необхідно:

а) вийняти прилад з футляра і встановити горизонтально на твердій підставі;

б) у справному приладі при обертанні ручки генератора стрільця повинна

встановитися на відмітці « ∞ » шкали «M Ω »;

в) поставити перемичку «Л» – «позначення землі» (Э);

г) у справному приладі при обертанні ручки генератора стрілець повинна встановитися на відмітці «0» шкали «M Ω ».

Якщо відхилення стрілки від вказаних відміток перевищує відстань, відповідну основній погрішності, то прилад вважається несправним. Поверхня кришки між затисками необхідно містити в чистоті. Забруднення проміжків між затисками може привести до додаткової погрішності при вимірюванні великих опорів.

Порядок роботи з приладом

Підключити прилад відповідно до необхідної схеми вимірювань, рис. 1. 8. Кожній схемі відповідає своя шкала вимірювань на індикаторі приладу.

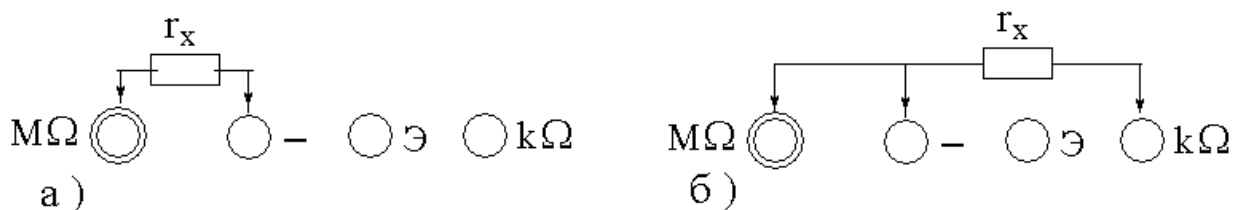


Рисунок 1. 8. Вимірювальні схеми: а) – «M Ω »; б) – «k Ω ».

Обертаючи ручку генератора в необхідному темпі, провести відлік за відповідною шкалою.

У тих випадках, коли результат вимірювання опору ізоляції об'єкту мегомметром типа М4100/5 може бути спотворений поверхневими струмами витoku, необхідно вжити заходи, що виключають попадання поверхневих струмів в робочу рамку логометра. Для цього на ізоляцію об'єкту накладають струмовідводчий електрод, який приєднують до затиску приладу «Э». Схема приєднання мегомметра приведена на рис. 1. 9 а.

У разі вимірювання опору ізоляції між ланцюгами, ізольованими від землі, до яких відноситься опір ізоляції між жилами кабелю, затиски «Л» і «позначення землі» приєднуються до знеструмлених жил кабелю, а затиск «Э» – до броні кабелю. Схема приєднання приладу в цьому випадку приведена на

рис. 1. 9 б.

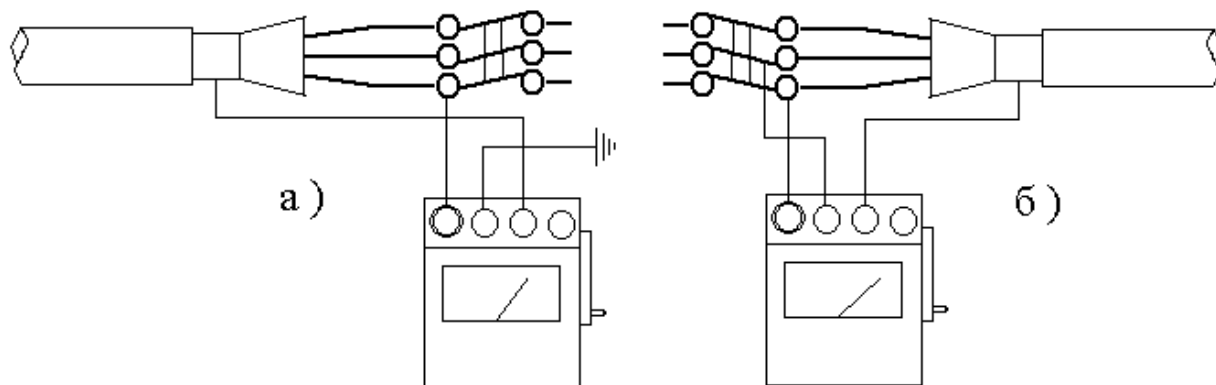


Рисунок. 1. 9. Схеми приєднання мегомметра М4100 з екраном:
а) – вимірювання фазної ізоляції; б) – вимірювання міжфазної ізоляції.

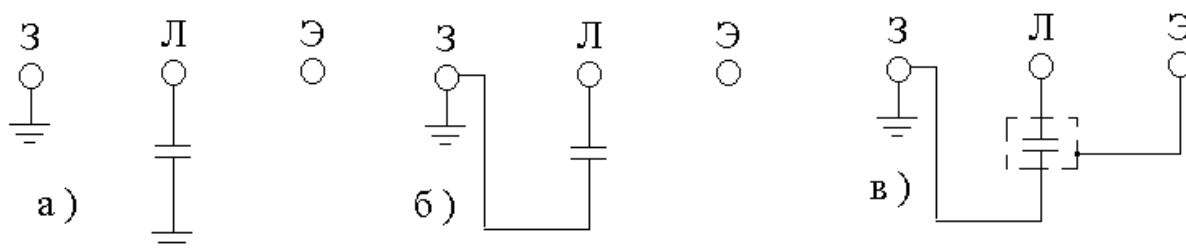


Рисунок 1. 10.. Основні схеми вимірювання опору ізоляції:
а – щодо землі; б – між струмоведучими (стрижнями); в – між струмоведучими жилами з виключенням впливу струмів витoku.

1. 3. Зміст роботи

1. Вимірювання опору твердій ізоляції щодо корпусу.
2. Вимірювання опору твердій ізоляції між провідниками.
3. Вимірювання коефіцієнта абсорбції R60/R15 .

1. 4. Вказівки до виконання роботи

При вимірюванні за допомогою мегомметра опору електричної ізоляції слід враховувати температуру і вологість навколишнього повітря, від значення яких у великій мірі залежить результат вимірювання.

1. 5. Порядок виконання роботи

Значення опору ізоляції у великій мірі залежить від температури. Вимірювання слід проводити при температурі ізоляції не нижче $+5^{\circ}\text{C}$, окрім випадків, обумовлених спеціально.

При вимірюванні абсолютних значень опору ізоляції електроустаткування її струмоведуча частина приєднується проводами з посиленою ізоляцією (типа ПВЛ) до виведення Л мегомметра. Вивід 3 і корпус або конструкції, щодо яких проводиться вимірювання, надійно заземляють через загальний контур заземлення. Опір ізоляції визначається свідченням стрілки мегомметра, сталою після закінчення 60 з після подачі напруги.

1. Вимірювання опору твердій ізоляції щодо корпусу.

Зібрати вимірювальну схему. Підготувати таблицю вимірювань. Провести триразове вимірювання опору ізоляції кожного з трьох зразків, обчислити середнє значення.

2. Вимірювання опору твердій ізоляції між провідниками.

Зібрати вимірювальну схему. Підготувати таблицю вимірювань. Провести триразове вимірювання опору ізоляції кожного з трьох зразків, обчислити середнє значення.

3. Вимірювання опору ізоляції і коефіцієнта абсорбції R_{60}/R_{15} .

Вивчити методику визначення абсорбції вологи твердою ізоляцією. Зміряти опір сухих зразків і зволжених.

Зміряти і визначити коефіцієнт абсорбції вологи ізоляцією для трьох зразків.

$$K_{аб} = R_{60}/R_{15}$$

Звести дані в таблицю для кожного зразку

№	U=200В	U=500В	U=1000В	U=2500В
---	--------	--------	---------	---------

	R_{15}	R_{60}	R_{15}	R_{60}	R_{15}	R_{60}	R_{15}	R_{60}
1								
2								
3								
4								
5								
$R_{сер}$								
$K_{аб}$								

При вимірюваннях дотримувати умови швидкості й рівномірності обертання генератора приладу.

1. 6. Структура звіту

- Тема і мета роботи;
 - Короткий опис. Схема і умови експерименту;
 - План і дані досліджень;
 - Обробка результатів. Характеристики і графіки;
 - Висновки і рекомендації.
 - Відповіді на контрольні питання

Контрольні питання

1. Яка нормована величина опору ізоляції кабельних ліній?
2. Як визначається коефіцієнт абсорбції?
3. Які фізичні процеси відбуваються в твердих діелектриках під дією теплових впливів?

4. Як виміряють корпусну та виткову ізоляцію в електричних машинах?
5. Які класи напруг мають мегомметри?
6. Принцип дії мегомметра?

Лабораторна робота 2.

Набуття навиків роботи з лабораторній установки АП-70

2.1. Мате. Ознайомитись з принципом роботи лабораторної установ АП-70

2.3. Опис установи

Апарат для випробування ізоляції типу АП-70 призначений для визначення $U_{пр}$ матеріалів та випробування ізоляції кабелів.

Напруга від мережі через блокувальні контакти та запобіжники підводиться до регулювального трансформатора TV1, що служить для плавної зміни напруги, і до трансформатора розжарювання кенотрону TV2. Вмикання високої напруги здійснюється шляхом включення автоматичного вимикача QF1, що має три обмотки; дві з них з'єднані послідовно (причому одна шунтується перемикачем захисту S2). Розімкнене положення цього перемикача відповідає "чутливому" захисту: автомат спрацьовує при пробі на стороні змінного струму і залишається включеним, якщо струм в ланцюзі випрямленої напруги не перевищує 5 мА. Коли перемикач S2 замкнутий, здійснюється "грубий" захист: автомат не спрацьовує при короткому замиканні на високій стороні і залишається включеним, якщо потужність на стороні високої напруги при 50 кВ не перевищує 2 кВА. Такий режим має тривати не більше 1 хв. Вимірювання напруги на зразку проводиться вольтметром кV класу 1.5 на стороні низької напруги, проградуирований в кіловольтах. Конденсатори служать захисту від перенапруги первинної обмотки. При синусоїдальній формі кривої напруги живлення вторинна напруга високовольтного трансформатора в режимі холостого ходу не відрізняється від синусоїдальної більш ніж на 5%. Резистор R1 служить для захисту трансформатора від навантаження при пробі зразка. В установці є посудина з електродами для стандартного випробування рідких матеріалів. Випробування на постійному струмі виробляють за допомогою

однонапівперіодного випрямляча, для отримання якої використовується кенотрон VL1; на зразок подається постійна напруга негативної полярності. Якщо необхідно виміряти струм витoku, то для цього використовується мікроамперметр PA1 в анодному ланцюзі. Захист мікроамперметра від перевантажень здійснюється за допомогою розрядника FV1, шунтуючого конденсатора C3 та опору R2. Апарат забезпечений пультом управління, захисною огорожею та заземлюючою штангою для зняття заряду з випробуваного зразка та заземлення виведення високої напруги. Похибка при вимірі випробувального напруження вбирається у $\pm 2\%$.

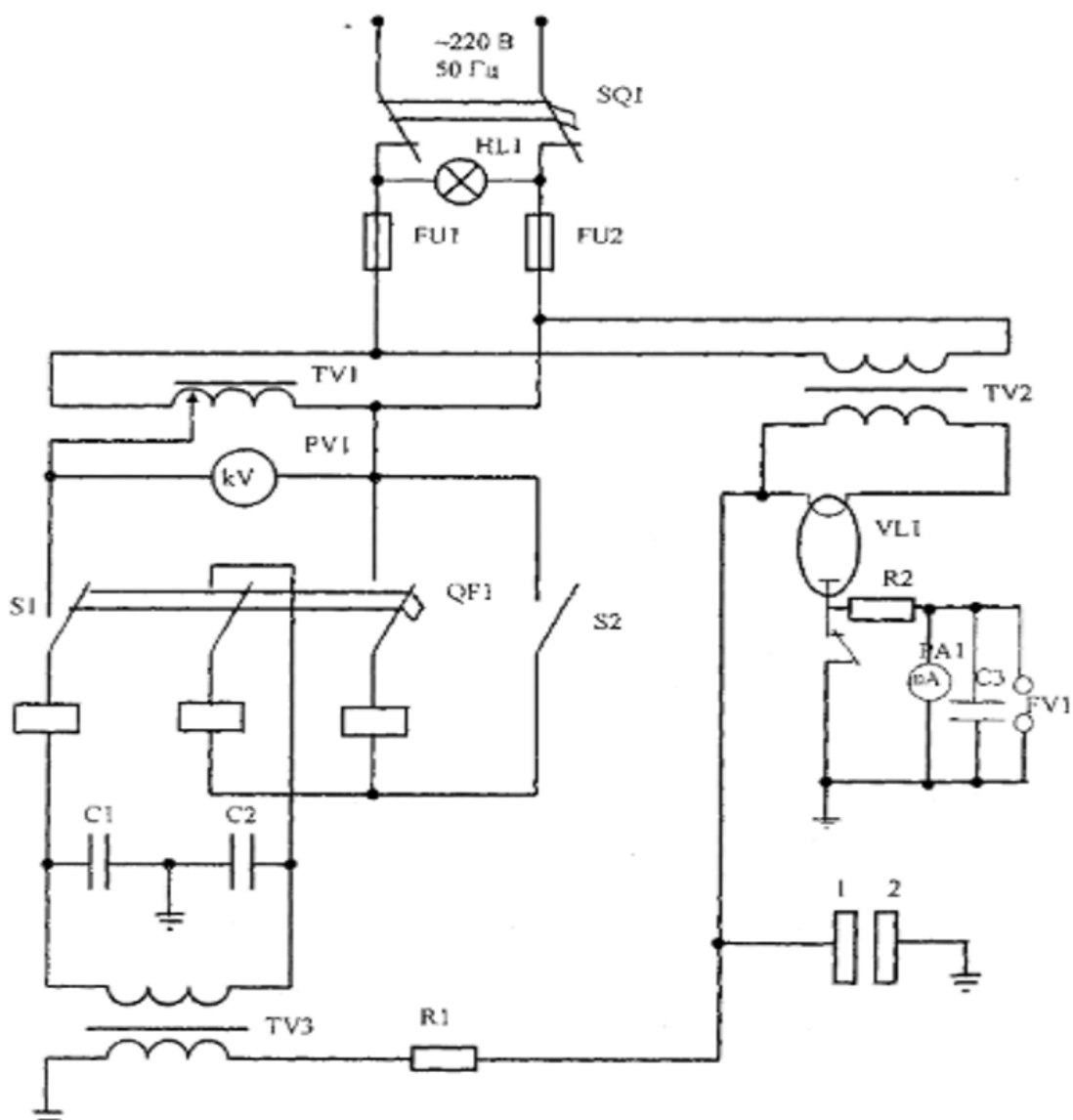


Рисунок 2.1. Принципова електрична схема АІІ-70

Випробувальна установка містить:

QF1 – автоматичний вимикач;

SQ1 - блокувальний контакт;

SI, S2 – перемикач захисту;

VL1-кенотрон;

FU1, FU2 - запобіжник;

TV1 – регулювальний трансформатор;

TV2 - трансформатор розжарювання кенотрону;

TV3 – випробувальний трансформатор для підвищення напруги;

PA]-мікроамперметр;

FV1 – розрядник, 1,2 – електроди.

2.4 Технічні характеристики приладів апарати АП -70

Номінальна напруга мережі однофазного струму частотою 50Гц - 127В, 220В;

Найбільша змінна напруга приладу апарат АП-70 – 50кВ;

Найбільша випрямлена напруга – 70кВ;

Випрямлений струм з боку високої напруги – 5мА;

Вихідна хвилинна потужність високовольтного трансформатора приладу **апарат АП-70** – 2кВА;

Тривала потужність високовольтного трансформатора – 0,5кВА;

Маса – 175кг;

Прилад розрахований для експлуатації у стаціонарних умовах;

Температура навколишнього повітря – від +10°C до +35°C (граничні значення температури: верхнє +40°C, нижнє +1°C);

Відносна вологість повітря - не більше 80% за температури +25°C, без конденсації вологи;

Атмосферний тиск – 84000Па-106600Па (630мм.рт.ст.-800мм.рт.ст.);

У комплект поставки приладу апарат АП-70 входять:

- пульт управління – 1шт;

- кенотронна приставка – 1 шт;
- розрядник ручний – 1 комплект;
- захисна огорожа - 1 шт;

Виробник гарантує відповідність якості приладу **апарат АП-70** вимогам технічних умов ТУ за дотримання споживачем умов та правил зберігання, транспортування, монтажу, експлуатації встановлених технічними умовами та експлуатаційною документацією.



AI-70 фотографія приладу.



AI-70 пульт керування.



AI-70 Кенотронна приставка.



AI-70 розрядник ручний.



AI-70 розрядник ручний вид спереду.



AI-70 високовольний трансформатор.



AI-70 високовольний трансформатор вид спереду.

Рисунок 2.2. Елементи установи АП-70

Контрольні питання

1. Призначення установи АП-70.
2. Принцип дії високовольного трансформатора.
3. Для чого потрібен кенотрон?
4. Яка напруга використовується для іспитів?
5. Опишіть з чого складається пульт управління.
6. За рахунок чого можемо змінювати рівень напруги?

Лабораторна робота № 3.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ ПОВІТРЯНИХ ПРОМІЖКІВ НАПРУГО. ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

3.1. Мета роботи: провести експериментальне дослідження залежності розрядних напруг постійного струму у повітрі від відстані між електродами; конфігурації електричного однорідного поля форми і полярності напруги, що прикладається постійна.

3.2. Теоретичні положення

Короткі теоретичні відомості

Із газоподібних діелектриків для утворення зовнішньої ізоляції використовується повітря, а для внутрішньої ізоляції – повітря, вуглекислий газ, елегаз.

Якщо до ізольованих один від одного електродів прикласти напругу, то між ними виникне електричне поле. Таке поле, крім іншого, характеризується також параметром, що має назву «напруженість електричного поля» (E). Цей параметр прямо пропорційно залежить від значень прикладеної до електродів напруги та визначає силу, з якою поле діє на заряджені частинки і викликає їх рух. Така сила буде тим більшою, чим більшим буде значення E .

Форма і взаємне розташування електродів, які створюють електричне поле, впливають на це поле таким чином, що значення E може бути однаковим для кожної точки міжелектродного проміжку або в якійсь із зон цього проміжку відрізнятись від значень E інших його зон. Залежно від розподілення напруженості, електричні поля прийнято розділяти на однорідні (напруженість по всьому об'єму міжелектродного проміжку однакова) та неоднорідні (напруженість – різна).

Однорідне поле створюється тільки такою парою електродів, які являють собою дві паралельні площини з плоскими поверхнями нескінченних розмірів. Наявність кривизни чи обмеженої площі однієї або обох поверхонь електродів

призводить до викривлення силових ліній електричного поля, а отже до відмінностей значень напруженостей окремих зон цього поля. Більша щільність силових ліній, а отже і більша напруженість електричного поля, буде біля скривлених поверхонь електродів або їх країв. Якщо оперувати назвою «радіус кривизни», то стане можливим наступне уточнення: у разі, коли поверхня одного із електродів має викривлення у бік іншого електрода, тоді напруженість електричного поля біля викривленої поверхні буде тим більшою, чим меншим буде радіус кривизни цього викривлення. Наприклад, для пари сфероподібних електродів різного діаметру значення E буде більшим поблизу поверхні електрода меншого діаметра.

Залежно від кривизни та взаємного розташування скривлених поверхонь електричні поля між ними бувають майже однорідними (квазіоднорідними) чи неоднорідними. Наприклад, електричне поле між двома однаковими сферами діаметром (D), розташованими на відстані (L), меншій ніж їх радіус ($L < 0,5 D$), буде квазіоднорідним, але якщо ці сфери віддалити на більшу відстань, то поле між ними стане спочатку слабо неоднорідним, а потім різко неоднорідним. Аналогічні за якістю зміни відбуваються з полем у проміжку між коаксіальними циліндрами при зміні співвідношень діаметрів зовнішнього і внутрішнього електродів. Найбільш показовим прикладом неоднорідного (причому – різко неоднорідного) поля є таке, що створюється парою електродів:

стрижень і площина або двох коаксіальних циліндрів з радіусами R (для більшого циліндра) та r (для меншого циліндра) за умови, коли $R \gg r$. Квазіоднорідним електричне поле у випадку коаксіальних циліндрів буде за умови, коли $1 < R/r < e$ з константою $e=2,718$.

Ступінь неоднорідності електричного поля характеризується коефіцієнтом неоднорідності K_n , що відповідає відношенню максимальної напруженості електричного поля даного проміжку E_{max} до середньої напруженості цього ж проміжку $E_{сер}$:

$$K_n = E_{\max} / E_{\text{сер.}}$$

Середня напруженість $E_{\text{сер}}$ – це відношення прикладеної до електродів напруги U до найменшої відстані між цими електродами L :

$$E_{\text{сер}} = U/L.$$

Для однорідних полів $K_n = 1$ (тобто $E_{\max} = E_{\text{сер}} = E$), для слабо неоднорідних або квазіоднорідних полів – $1 < K_n \leq 3$, для різко неоднорідних – $K_n > 3$. Для слабо неоднорідних та різко неоднорідних полів $E_{\max} \neq E_{\text{сер}}$.

Розрядний проміжок утворюється системою електродів. Конфігурації електродів, їх системи і пов'язані з ними властивості розрядних проміжків можуть бути наступні, рис. 3. 1.

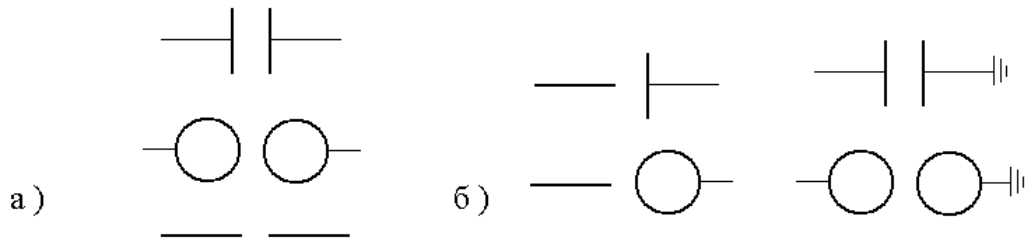


Рис. 3. 1. Системи електродів: а) симетричні; б) несиметричні.

Симетрична система електродів може формувати однорідне поле (площина — площина), слабонеоднорідне (куля — куля) і різконеоднорідне (стрижень — стрижень). Несиметричні системи електродів формують неоднорідні поля.

Механізми формування розряду повною мірою відображаються вольт-амперною характеристикою розрядного проміжку, рис. 3. 2.

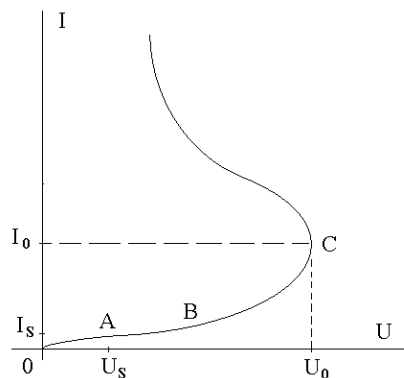


Рис. 3. 2. Вольт-амперна характеристика газового розряду.

У міру збільшення напруги струм в проміжку зростає за рахунок того, що вся більша кількість зарядів потрапляє під дією електричного поля на проміжок між електродами, ділянка OA . На ділянці AB струм практично не міняється, оскільки заряди, що все утворюються за рахунок зовнішніх іонізаторів, потрапляють на електроди; величина струму насичення I_s визначається інтенсивністю іонізатора, що впливає на проміжок. При подальшому збільшенні напруги струм достатньо різко зростає, ділянка BC , що свідчить про інтенсивну іонізацію газу під дією електричного поля. При напрузі U_0 відбувається різке збільшення струму в розрядному проміжку, який при цьому втрачає властивості діелектрика і перетворюється на провідник.

Явище, при якому між електродами газового проміжку виникає канал високої провідності, називають **електричним пробоем** або **електричним розрядом**, маючи на увазі процес утворення пробою.

Електричний розряд, відповідний ділянці $OABC$ характеристики, називають **несамостійним**, оскільки струм в газовому проміжку визначається інтенсивністю діючого іонізатора. Розряд на ділянці вище точки C називають **самостійним**, оскільки струм розряду на цій ділянці залежить тільки від параметрів самого електричного ланцюга (його опору і потужності джерела живлення) і для його підтримки не потрібне утворення заряджених часток за рахунок зовнішніх іонізаторів. Напруга U_0 , при якій починається самостійний розряд, називають **початковою напругою**.

Форми самостійного розряду залежно від умов, в яких протікає розряд, можуть бути різними.

При малих тисках, коли із-за невеликого числа молекул газу в одиниці об'єма проміжок не може придбати велику провідність, виникає **тліючий розряд**. Щільність струму при тліючому розряді невелика ($1\text{—}5\text{ мА/см}^2$), розряд охоплює весь простір між електродами.

При тисках газу, близьких до атмосферного і вище, у випадку, якщо потужність джерела живлення невелика або напруга прикладається до проміжку на короткий час, має місце **іскровий розряд**. При тривалій дії напруги іскровий розряд має вигляд іскор, що послідовно виникають між електродами.

Як ізоляція між проводами й опорами повітряних ліній електропередачі, зовнішньої ізоляції трансформаторів і електричних апаратів широко використовуються повітряні проміжки. Знання основних закономірностей виникнення електричних розрядів у повітрі, врахування впливу різних факторів на електричну міцність повітряних проміжків є необхідними при проектуванні та експлуатації високовольтного устаткування і високовольтних конструкцій.

Явище електричного пробою в газах пояснюється на основі фізичних уявлень про утворення і розвиток електронної лавини у процесі іонізації атомів або молекул газу електронами в електричному полі. Інтенсивність процесу іонізації характеризується коефіцієнтом ударної іонізації a , що визначається як кількість іонізацій, які чинить один електрон на шляху в 1 см уздовж силових ліній електричного поля.

У повітрі, як і в інших електронегативних газах, основним процесом, що перешкоджає розвитку ударної іонізації, є прилипання електронів до нейтральних часток з утворенням негативних іонів. Характеристикою цього процесу є коефіцієнт прилипання η , що залежить від співвідношення E/p (напруженості електричного поля до тиску в газі) і виду газу й отримується з експериментальних даних.

Розвиток ударної іонізації в електронегативних газах з урахуванням процесів втрат електронів описується за допомогою ефективного коефіцієнта ударної іонізації:

$$a_{ef} = a - \eta \quad (3.1)$$

Для виникнення електричного розряду в газі необхідно, щоб у міжелектродному проміжку з'явився хоча б один електрон у результаті дії природних іонізаторів. У цьому випадку в сильних електричних полях зіткнення електрона з нейтральною часткою викликає ударну іонізацію – утворюються два вільних електрони, кожний з яких робить нові акти іонізації, тобто виникає лавина електронів. Кількість електронів у лавині.

$$n = n_0 \exp\left[\int_0^x \alpha_{\text{еф}}(E) dx\right], \quad (3.2)$$

де n_0 – кількість початкових електронів;

x – шлях, пройдений лавиною вздовж силових ліній електричного поля.

Виникнення електронної лавини супроводжується утворенням позитивних іонів і фотонів, які, взаємодіючи з поверхнею катода, викликають появу вторинних електронів, що імітуються катодом. Такий розряд підтримуватиметься самостійно без участі зовнішніх іонізаторів, якщо позитивні іони і лавина, що розвиваються в міжелектродному проміжку, своїм випромінюванням викликать появу не менш одного нового електрона, що, у свою чергу, створюватиме нову лавину з більшою кількістю електронів.

При підвищеному тиску газу розряд розвивається у виді канала-стрімера. Напруга, при якій у міжелектродному проміжку виконується умова самостійності розряду, називається початковою U_0 . У неоднорідних електричних полях повному електричному пробію проміжку передують виникнення корони – одного з видів самостійного розряду. Тому в неоднорідних полях початкова напруга відповідає напрузі виникнення корони, а в однорідних – електричному пробію.

Початкові і пробивні напруги (амплітудні значення) для двох однакових електродів найпростіших геометричних форм можна визначити з емпіричних виразів.

Для плоских електродів:

$$U_0 = 24,5\delta d + 6,4\sqrt{\delta d}, \quad (3.3)$$

де $\delta = pT_0/p_0T$ – відносна щільність повітря;

p_0, T_0 – відповідно тиск і температура повітря при нормальних умовах ($p_0 = 101300$ Па, $T_0 = 293$ К);

p, T – відповідно тиск і температура повітря в умовах експерименту;

d – відстань між електродами, см.

При електродах за формою сфера-сфера:

$$U_0 = \frac{1}{f} 27,2\delta \left(1 + \frac{0,54}{\sqrt{r\delta}} \right) d, \quad (3.4)$$

де f – геометричний фактор;

r – радіус сфери.

При симетрично включеній напрузі

$$f = 0,25 \left[\frac{d}{r} + 1 + \sqrt{\left(\frac{d}{r} + 1\right)^2 + 8} \right] \quad (3.5)$$

Якщо одна зі сфер заземлена, величина f визначається з табл. 2.1.

Таблиця 3.1. Значення геометричних факторів

d/r	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,5	2,0
f	1,03	1,07	1,1	1,15	1,2	1,25	1,31	1,38	1,45	1,52	2,01	2,34

За умови $d/r \ll 2$ формула (2.4) дає величину пробивної напруги проміжку, при $d/r > 2$ – напруги початку корони.

При електродах форми коаксіальних циліндрів:

$$U_0 = 24,5\delta [1 + 0,65(\delta r_0)^{-0,38}] r_0 \ln \frac{R}{r_0} \quad (3.6)$$

де r_0, R – відповідно радіуси внутрішнього і зовнішнього циліндрів.

Формула (2.6) дає значення пробивної напруги проміжку при $R/r_0 < 2,718$ і напруги початку корони – при $R/r_0 > 2,718$. З аналізу виразу (3.6) випливає, що величина U_0 має екстремум при $R/r_0 = 2,718$.

У різко неоднорідних несиметричних електричних полях (стержень – площина, коаксіальні циліндри при $R \gg r_0$) при впливі постійної напруги величина пробивної напруги повітряного проміжку залежить від полярності електрода з меншим радіусом кривизни (ефект полярності). При цьому напруга виникнення корони менша при негативній полярності, а пробивна

напруга – при позитивній полярності електрода з малим радіусом кривизни. Цей ефект пояснюється з істотним впливом поля об'ємного позитивного заряду іонів біля катода на розподіл напруженості електричного поля у проміжку.

При негативній полярності електрода напруженість електричного поля на його поверхні збільшується за рахунок впливу позитивного об'ємного заряду іонів і зменшується у глибині проміжку. Це полегшує появу корони на поверхні електрода, але утруднює процес поширення розряду у глибину проміжку (в область слабого поля). При позитивній полярності спостерігається зворотна картина: поле на поверхні електрода послабляється, що утруднює появу корони, а в глибині проміжку підсилюється – пробивна напруга знижується.

Розміщуючи в міжелектродному проміжку діелектричний бар'єр, можна підвищити електричну міцність повітряного проміжку при позитивній полярності електрода з малим радіусом кривизни. При цьому існує оптимальне положення бар'єра в міжелектродному проміжку, при якому досягається найбільша електрична міцність. Бар'єрний ефект пояснюється вирівнюванням електричного поля між бар'єром, на якому осідають позитивні іони, що рухаються вздовж силових ліній електричного поля, і електродом з великим радіусом кривизни. При цьому підвищення пробивної напруги проміжку може відбуватися при незначній власній електричній міцності діелектричного бар'єра. На величину пробивної напруги повітряного проміжку впливає вологість повітря. Підвищення абсолютної вологості приводить до деякого підвищення електричної міцності повітряних проміжків за рахунок зменшення коефіцієнта ударної іонізації електронами в результаті їх прилипання до електронегативних молекул водяної пари. Приведення експериментальних значень U_0 , до умов нормальної відносної вологості повітря (63%) при $T = 293$ К виконується за допомогою поправочного коефіцієнта k , який отримують з виразу:

$$U_{0H} = U_0 k, \quad (3.7)$$

де U_{0H} – розрядна напруга при нормальних умовах.

Графік визначення коефіцієнта k наведений у ГОСТ 1516.2-76.

Значення середньої пробивної напруженості електричного поля проміжку, який досліджується, визначається за формулою:

$$E_{\text{пр.ср.}} = \frac{U_{\text{ср}}}{d}, \quad (3.8)$$

де $U_{\text{ср}}$ – середнє значення пробивної напруги проміжку, який досліджується.

3.3 Описання експериментальної установки

Принципова схема експериментальної установки представлена на рис.

1.1. Джерелом високої напруги промислової частоти (50 Гц) є іспитовий трансформатор TV2. Стенд живиться від мережі напругою 220 В. Напруга надходить на видимий розрив QS1, з якого поступає на автомат QF1, що захищає вхідні ланцюги живлення від струму короткого замикання. При включенні автомату засвічується табло "Напруга". Далі, якщо перемикач SA1 знаходиться у правому положенні (дивлячись на схему), а це означає, що в захисному огороженні штанга із переносним заземленням висить на ньому, і, якщо замкнутий перемикач SA2, тобто закриті двері огороження, то вхідна напруга подається на комутаційну апаратуру стенда. У такому разі, натиснувши кнопку SB2 ("Пуск"), вмикається контактор КМ1. Контакт своїми контактами КМ1.1 і КМ1.2 подає вхідну напругу на регулятор напруги TV1, про що свідчить підсвітка табло "Висока напруга". Контакт КМ1.3 призначений для блокування кнопки SB2. Запобіжник FU1 захищає ланцюги керування стендом.

З регулятора напруги TV1 напруга надходить на первинну обмотку силового трансформатора TV2. Вимірювальні прилади – амперметр PA1 і вольтметр PV1 контролюють вхідну напругу та струм споживання трансформатора TV2.

Величина вторинної напруги вимірюється за допомогою кіловольтметра PV2, який включений в ланцюг ємнісного дільника напруги C1...C6. При такому включенні PV2 його покази треба перемножувати на три.

Варто пам'ятати, що при вимірах змінної за характером напруги одержують діючі значення. Для одержання амплітудних значень при зіставленні з розрахунковими значеннями отримані дані збільшуються на $\sqrt{2}$.

Електроди різної форми закріплюються за допомогою з'єднань XT3 і XT4 на ізольованій конструкції. У схемі є можливість дистанційно змінювати відстань між електродами повітряного проміжку (ПП) за допомогою двигуна M1, який керується з пульта управління. Зміна форми напруги

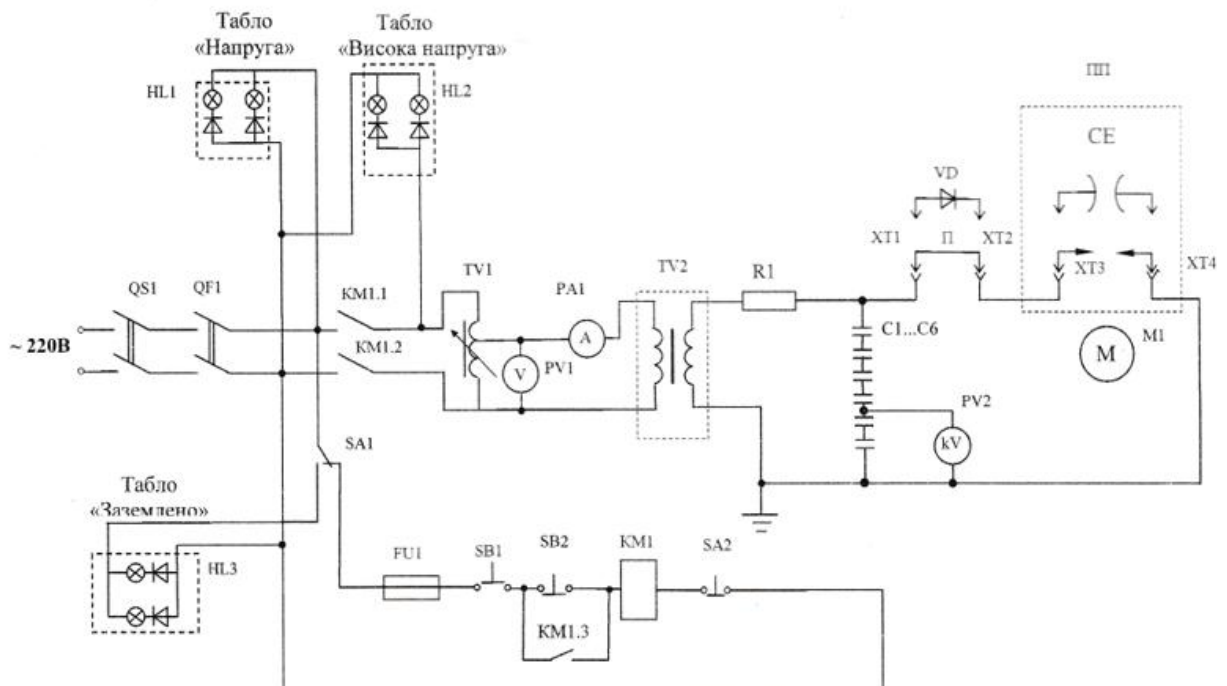


Рис. 3.3 Схема експериментальної установки

(змінна або постійна), яка прикладається до ПП, що досліджується, виконується за допомогою високовольтного випрямляча VD1 або перемички П. Водяний резистор R1 обмежує розрядний струм, тим самим захищаючи трансформатор TV2 і випрямляч VD1 від перевантаження за струмом.

Кнопка SB2 ("Стоп") виключає живлення контактора KM1, а тим самим і живлення регулятора напруги TV1.

Включення стенда неможливе, коли перемикач SA1 знаходиться в лівому положенні (дивлячись на схему), а це означає, що в захисному огороженні штанга із переносним заземленням не висить на ньому (горітиме табло "Заземлено"). Стенд також не включиться, якщо розімкнений перемикач SA2, тобто відкриті двері.

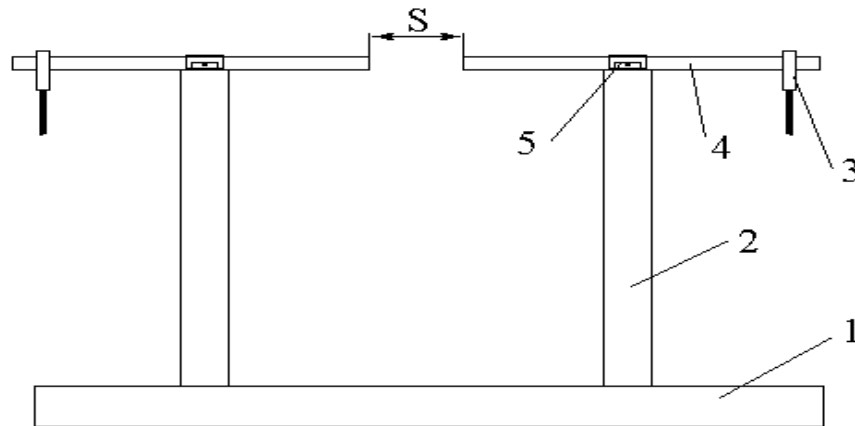


Рис. 3.4. Лабораторна установка: 1 — підставка, 2 — стійка, 3 — контакт з провідником, 4 — електрод, 5 — фіксатор

3.4. Підготовка стенда до роботи і методика виконання лабораторної роботи

1. Отримати допуск до виконання лабораторної роботи, розписатись у журналі з техніки безпеки при виконанні робіт у високовольтній лабораторії.
2. Включити видимий розрив.
3. Включити автомат (світиться табло "Напруга" і з'являється світловий зайчик на кіловольтметрі).
4. Вдягнувши діелектричні рукавиці, відкрити двері захисної огорожі.
5. За допомогою діелектричної штанги наложити захисне заземлення на високовольтний трансформатор (світиться табло "Заземлено").
6. Установити електроди потрібної форми.

7. Виставити відстань між цими електродами за вимірювальною лінійкою на нуль.

8. За допомогою діелектричної штанги зняти захисне заземлення з високовольтного трансформатора.

9. Діелектричну штангу повісити на місце (на вимикач).

10. Закрити двері захисного огороження.

11. Зняти діелектричні рукавиці.

12. Переконайтесь у наявності діелектричного килимка перед пультом.

13. Регулятор напруги "ЛАТР" вивести в нуль (крайнє ліве положення).

14. Включити кнопку "ПУСК".

15. За допомогою тумблера "Керування системою електродів" виставити потрібну відстань між електродами.

16. Повертаючи ручку "ЛАТР" вправо, добитися розряду між електродами, і як тільки він розпочався, відразу натиснути кнопку "Стоп", зафіксувавши наочно величину пробивної напруги на кіловольтметрі.

Пробивну напругу фіксувати вольтметром PV2. При незмінній відстані між електродами дослід повторити п'ять разів для розрахунку середнього значення пробивної напруги. Потім змінити відстань між електродами і дослід повторити. Дані вимірів пробивних напруг занести у табл. 3.2.

Дотримуючись вказаних пунктів та згідно із завданням, встановити іншу конфігурацію електродів.

Доступ до електродів, розміщених на дослідному полі, можливий тільки при цілком відключеній установці і накладенні переносного заземлення на вивід вторинної обмотки трансформатора TV2.

3.5. Завдання

1. При підготовці до виконання лабораторної роботи ознайомитися з правилами техніки безпеки (досконало вивчити інструкцію №155, яка знаходиться в лабораторії), зі схемою установки, розташуванням її елементів, методикою проведення роботи.

2. Дослідити електричну міцність повітряних проміжків при змінній напрузі промислової частоти (50 Гц) для проміжків: а) площа – площа; б) стержень – стержень; в) стержень – площа.

Дані вимірів $U_{пр}$ занести в табл. 3.2. Кількість рядків табл. 3.2 залежатиме від вказаних викладачем відстаней для дослідження заданих конфігурацій електродів.

3. Дослідити електричну міцність повітряних проміжків площа – площа і стержень – стержень при постійній напрузі. Зняти залежності $U_{пр} = f(d)$ для проміжку стержень – площа при позитивній полярності стержня і $d = (1...6)$ см, і при негативній полярності стержня і $d = (1...5)$ см.

Таблиця 3.2. Експериментальні та розрахункові значення пробивних напруг повітряних проміжків

Конфігурація, полярність електродів	d , см	$U_{пр}$, кВ						$E_{пр.ср}$, кВ/см	$U_{розр.}$, кВ	σ
		U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	$U_{ср}$			

4. Розрахувати значення пробивних напруг $U_{розр.}$ за формулами (2.3) та (2.4) і побудувати графічні залежності для проміжків площа – площа і стержень – площа за розрахунками і отриманими в ході лабораторної роботи даними. Визначити середні арифметичні значення пробивних напруг $U_{ср}$ для кожного досліду, значення середньої пробивної напруженості електричного поля проміжку $E_{пр.ср}$ й отримані результати занести в табл. 1.2. Визначити середню квадратичну помилку вимірів σ для кожного досліджуваного проміжку.

5. Проаналізувати залежності $U_{пр} = f(d)$ для проміжків з електродів різної конфігурації і при дії напруги різної форми. Порівняти отримані в ході роботи і розрахункові дані. Зробити висновки по роботі.

Контрольні запитання

1. Загальна характеристика газових діелектриків.
2. 2.. Небезпечні фактори при роботі з елєгазом.
3. Розподілення електричного поля в електродному проміжку.
4. Напруженість електричного поля.
5. Однорідне, квазіоднорідне, різко неоднорідне електричне поле.
6. Коефіцієнт неоднорідності електричного поля.
7. У чому полягають особливості електричного розряду в неоднорідних полях і чим вони обумовлені?
8. Що означають поняття початкової напруги і напруги повного розряду?
9. У чому полягає фізичний зміст рівняння самостійності розряду?

Лабораторна робота № 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ ПОВІТРЯНИХ ПРОМІЖКІВ НАПРУГО ЗМІННОГО СТРУМУ

4.1. Мета роботи: провести експериментальне дослідження залежності розрядних напруг змінного струму у повітрі від відстані між електродами; конфігурації електричного однорідного поля форми напруги, що прикладається постійно. Провести порівняльний аналіз величин розрядних напруг постійного та змінного струмів.

4.2. Теоретичні положення

Теоретичні положення приведені у лабораторній роботі №2 та №3.

Дія напруги змінного струму відрізняється від дії напруги постійного струму. Розрядна напруга в однорідному полі набагато вища, ніж в неоднорідному, що треба враховувати при конструюванні та обслуговуванні електрообладнання.

Розглянемо два випадки (рис. 4.1). Якщо на стрижні «плюс», то електрони від катода рухаються до анода. Потрапивши в зону різкого підвищення напруженості, вони прискорюються, випереджаючи об'ємний позитивний заряд, що спотворює поле в міжелектродному проміжку, і осідають на стрижні-аноді. У результаті напруженість поля E біля гострого електроду зменшується, а напруженість у проміжку зростає. На ділянці АВ розподіл потенціалу різко неоднорідний, що призведе до іонізації і подальшого пробоя ділянки АВ при відносно незначних напругах

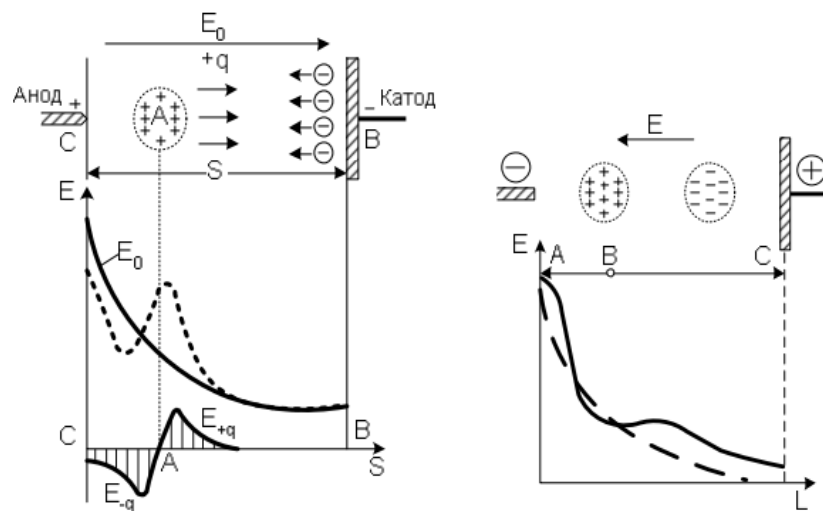


Рис. 4.1 – Розподіл напруженості електричного поля в міжелектродному проміжку при різних потенціалах стрижневого електрода

Якщо на стрижні «мінус», то електронна лавина виникає в тому ж об'ємі поблизу стрижня. Однак стартова швидкість лавини ще більша, тому що градієнт потенціалу на ділянці АВ значно вищий. Електрони прямують до позитивного електрода, залишаючи за собою об'ємний позитивний заряд E_{+q} , утворений іонами. Потрапивши в ділянку малого градієнта ВС, вони різко гальмуються і захоплюються молекулами кисню, утворюючи малорухомий негативний об'ємний заряд E_{-q} . У стрижня (ділянка АВ) – різка неоднорідність поля, що зменшує напругу запалювання видимої корони. На основній розрядній ділянці ВС середнє значення градієнта напруженості вирівнюється і тому величина розрядної напруги різко (удвічі) збільшується. Це явище

називається ефектом полярності й використовується для підвищення розрядної напруги в установках постійного струму (рис. 4.2)

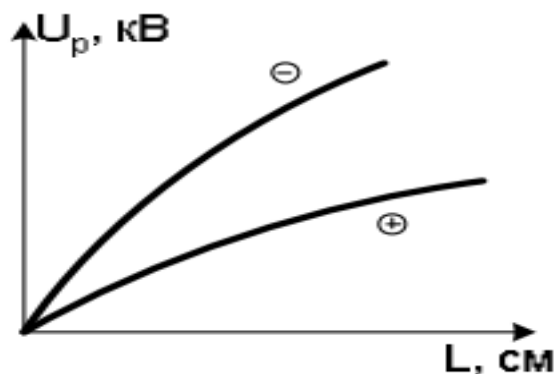


Рисунок 4.2. – Залежність розрядної напруги від полярності стрижневого електрода

4.3. Підготовка стенда до роботи і методика виконання лабораторної роботи

1. Отримати допуск до виконання лабораторної роботи, розписатись у журналі з техніки безпеки при виконанні робіт у високовольтній лабораторії.
2. Включити видимий розрив.
3. Включити автомат (світиться табло "Напруга" і з'являється світловий зайчик на кіло вольтметрі).
4. Вдягнувши діелектричні рукавиці, відкрити двері захисної огорожі.
5. За допомогою діелектричної штанги наложити захисне заземлення на високовольтний трансформатор (світиться табло "Заземлено").
6. Установити електроди потрібної форми.
7. Виставити відстань між цими електродами за вимірювальною лінійкою на нуль.
8. За допомогою діелектричної штанги зняти захисне заземлення з високовольтного трансформатора.
9. Діелектричну штангу повісити на місце (на вимикач).
10. Закрити двері захисного огородження.
11. Зняти діелектричні рукавиці.

12. Переконайтесь у наявності діелектричного килимка перед пультом.
13. Регулятор напруги "ЛАТР" вивести в нуль (крайнє ліве положення).
14. Включити кнопку "ПУСК".
15. За допомогою тумблера "Керування системою електродів" виставити потрібну відстань між електродами.
16. Повертаючи ручку "ЛАТР" вправо, добитися розряду між електродами, і як тільки він розпочавсь, відразу натиснути кнопку "Стоп", зафіксувавши наочно величину пробивної напруги на кіловольтметрі.

Пробивну напругу фіксувати вольтметром PV2. При незмінній відстані між електродами дослід повторити п'ять разів для розрахунку середнього значення пробивної напруги. Потім змінити відстань між електродами і дослід повторити. Дані вимірів пробивних напруг занести у табл. 4.2.

Дотримуючись вказаних пунктів та згідно із завданням, встановити іншу конфігурацію електродів.

Доступ до електродів, розміщених на дослідному полі, можливий тільки при цілком відключеній установці і накладенні переносного заземлення на вивід вторинної обмотки трансформатора TV2.

4.4. Завдання

1. При підготовці до виконання лабораторної роботи ознайомитися з правилами техніки безпеки (досконало вивчити інструкцію №155, яка знаходиться в лабораторії), зі схемою установки, розташуванням її елементів, методикою проведення роботи.

2. Дослідити електричну міцність повітряних проміжків при змінній напрузі промислової частоти (50 Гц) для проміжків: а) площа – площа; б) стержень – стержень; в) стержень – площа.

Дані вимірів $U_{пр}$ занести в табл. 4.2. Кількість рядків табл. 3.2 залежить від вказаних викладачем відстаней для дослідження заданих конфігурацій електродів.

3. Дослідити електричну міцність повітряних проміжків площа – площа і стержень – стержень при постійній напрузі. Зняти залежності $U_{пр} =$

$f(d)$ для проміжку стержень – площа при позитивній полярності стержня і $d = (1...6)$ см, і при негативній полярності стержня і $d = (1...5)$ см.

Таблиця 4.2. Експериментальні та розрахункові значення пробивних напруг повітряних проміжків

Конфігурація, полярність електродів	d , см	$U_{пр}$, кВ						$E_{пр.ср}$, кВ/см	$U_{розр.}$, кВ	σ
		U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	$U_{ср}$			

4. Розрахувати значення пробивних напруг $U_{розр.}$ за формулами (4.3) та (2.4) і побудувати графічні залежності для проміжків площа – площа і стержень – площа за розрахунками і отриманими в ході лабораторної роботи даними. Визначити середні арифметичні значення пробивних напруг $U_{ср}$ для кожного досліду, значення середньої пробивної напруженості електричного поля проміжку $E_{пр.ср}$ й отримані результати занести в табл. 4.2. Визначити середню квадратичну помилку вимірів σ для кожного досліджуваного проміжку.

5. Проаналізувати залежності $U_{пр} = f(d)$ для проміжків з електродів різної конфігурації і при дії напруги різної форми. Порівняти отримані в ході роботи №2 та №3і розрахункові дані. Зробити висновки по роботі.

Контрольні питання до лабораторній роботи № 4

1. Чому електрична міцність електропозитивних і електронегативних газів різна? У якому випадку вона вища і чому?
2. Чому електрична міцність повітряних проміжків з різко неоднорідним полем залежить від полярності електрода з малим радіусом кривизни?
3. Чим пояснити різні значення електричної міцності повітряних ізоляційних проміжків при різних формах електродів?

Лабораторна робота № 5.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ ПОВІТРЯ ПРИ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРИЧНОГО РОЗРЯДУ ПО ПОВЕРХНІ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ НАПРУГОЮ ЗМІННОГО СТРУМУ

5.1. Мета роботи: дослідити електричну міцність повітря з різною конфігурацією електричного поля при розвитку розряду по поверхні твердого діелектрика в іскрових проміжках на напруг змінного струму промислової частоти 50 Гц.

5.2. Теоретичні положення

Поверхневий розряд

Загальна характеристика поверхневого розряду. Внесення твердого діелектрика в повітряний проміжок може істотно змінювати умови й механізм розвитку розряду. Величина розрядної напруги при цьому знижується й залежить від тиску газу й форми електричного поля, властивостей твердого діелектрика, стану його поверхні й розташування щодо силових ліній електричного поля. Розряд уздовж поверхні діелектрика називається *поверхневим розрядом*. Закономірності розвитку розрядів уздовж поверхні твердого діелектрика необхідно знати для раціонального конструювання ізоляторів, які є важливими складовими високовольтних ізоляційних конструкцій.

Розглянемо вплив твердого діелектрика на виникнення й розвиток розряду в повітрі уздовж поверхні ізолятора. У конструкції рис. 5.1, *а* силові лінії електричного поля паралельні поверхні діелектрика й поле є слабо однорідним.

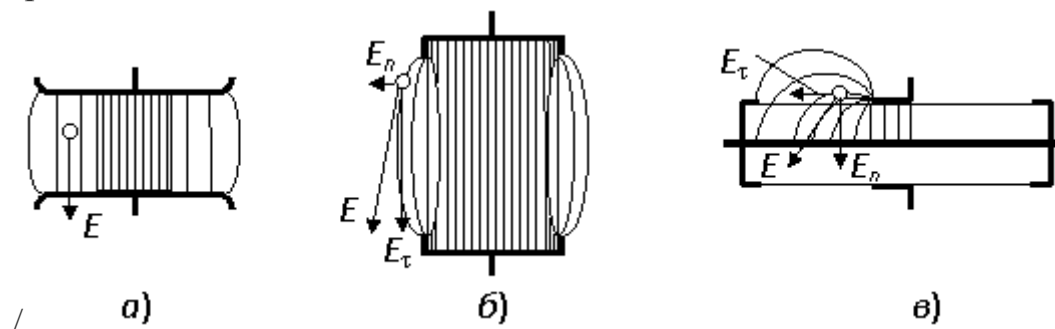


Рис. 5.1. Характерні конструкції повітряних проміжків із твердим діелектриком

У конструкції 5.1, *б* поле неоднорідне й тангенціальна складова напруженості поля на поверхні діелектрика E_t переважає над нормальної складової E_n . У конструкції рис. 5.1, *в* поле також неоднорідне, але переважає

нормальна складова. Перша конструкція порівняно рідко зустрічається в реальних умовах, але зручна для визначення впливу характеристик діелектрика на виникнення розряду, друга й третя конструкції зустрічаються часто (опорні й прохідні ізолятори). В ізоляційній конструкції рис. 5.1, *а* електрична міцність проміжку з діелектриком менше, ніж чисто повітряного проміжку (рис. 5.2, крива 5). Це пов'язано з адсорбцією вологи з навколишнього повітря на поверхні діелектрика, а також з мікро зазорами між твердим діелектриком й електродом у потрібній точці. Поверхня всіх тіл у повітрі покрита найтоншою плівкою води. Іони, що утворюються в цій плівці під дією електричного поля, переміщуються до електродів. У результаті цього поле поблизу електродів підсилюється, а в середині проміжку послабляється. Посилення поля біля електродів приводить до зниження електричної міцності проміжку. Це зниження тим більше, чим гігроскопічний діелектрик. Наприклад, скло є більш гігроскопічним матеріалом, чим глазурована порцеляна, тому напруга перекриття уздовж поверхні скла нижча, ніж уздовж порцеляни.

Зменшення напруги перекриття ізолятора при наявності мікро зазору між діелектриком й електродом або мікротріщин на поверхні діелектрика пов'язане зі збільшенням у них напруженості поля внаслідок розходження діелектричних проникностей повітря й твердого діелектрика (діелектрична проникність твердого діелектрика в 2-10 разів більше, ніж повітря). Збільшення напруженості поля в мікро зазорах приведе до іонізації й посилення поля в основному проміжку й зменшенню напруги перекриття (рис. 5.2, крива 4).

Для збільшення розрядної напруги проміжку із твердим діелектриком прагнуть використати малогігроскопічні діелектрики або створити покриття з малогігроскопічних матеріалів, що захищають діелектрик від контакту з парами води (наприклад, глазуровання поверхні порцеляни), а також забезпечити надійне, без мікро зазорів, спряження тіла ізолятора з металевою арматурою, використовуючи цементні закладення й еластичні прокладки.

В ізоляційній конструкції на рис. 5.1, *б* поле неоднорідне, отже й у випадку тільки повітряного проміжку розрядна напруга меншає, ніж в однорідному полі. Вплив гігроскопічності діелектрика й мікро зазорів тут якісно таке ж, як й у конструкції на рис. 5.1, *а*, але воно слабкіше виражено, тому що електричне поле й без того істотно неоднорідне (рис. 5.3). При досить великій неоднорідності поля в цій ізоляційній конструкції, як й у чисто повітряному проміжку, виникає коронний розряд. Озон, оксиди азоту, що утворюються при цьому, впливають на твердий діелектрик. Найбільшу небезпеку коронний розряд представляє для полімерної ізоляції, особливо якщо він має стримерну форму. Температура стримера досить висока, і

зіткнення його з поверхнею діелектрика може привести до термічного розкладання діелектрика і утворенню обвугленого сліду з підвищеною провідністю. Довжина цього сліду (треку) згодом зростає, що приводить до перекриття ізолятора з необоротною втратою їх електричної міцності. Все сказане справедливе й для конструкції на рис. 5.1, в. Більша нормальна складова електричного поля сприяє зближенню стримера з поверхнею діелектрика, що підвищує ймовірність ушкодження діелектрика. Електрична міцність цієї конструкції ще менша, ніж конструкції на рис. 5.1, б. Стримери, що розвиваються уздовж поверхні діелектрика, мають значно більшу ємність стосовно внутрішнього (протилежного) електроду, ніж у конструкції з перевагою тангенціального складового поля. Тому через стримери протікає порівняно великий струм. При певному значенні напруги струм зростає настільки, що температура стримерів стає достатньою для термічної іонізації. Термічно іонізований канал розряду, що розвивається уздовж діелектрика, на поверхні якого нормальна складова напруженості поля перевищує тангенціальну складову, називають **каналом ковзного розряду**.

Провідність каналу ковзного розряду значно більша провідності плазми стримера. Збільшення напруги на не перекритій частині проміжку приводить до подовження каналу ковзного розряду й повному перекриттю проміжку при меншому значенні напруги між електродами.

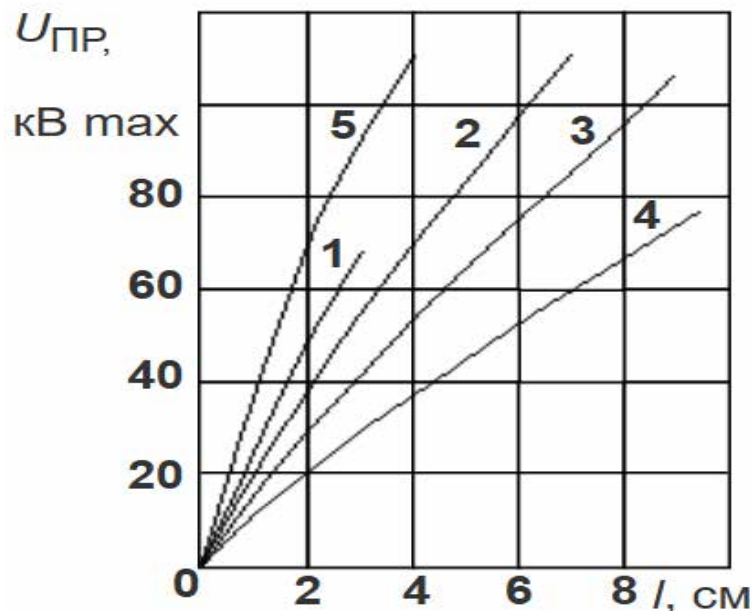


Рис.5.2 Залежність розрядної напруги по поверхні різних матеріалів в однорідному полі відстані
1-парафін, 2- фарфор, 3-турбоніт, 4- нешильний контакт електрода з діелектриком

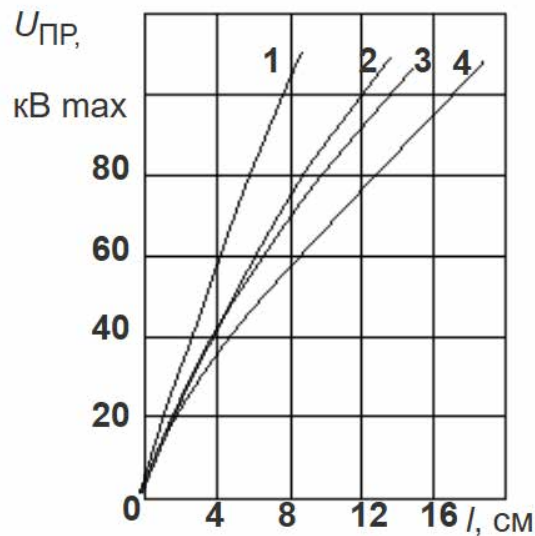


Рис. 5.3. Залежність розрядної напруги по поверхні зразків з різних матеріалів в полі з тангенціальною складовою від відстані
1- Пробій повітряного проміжку, 2- парафін , турбоніт, 3- фарфор, 4- скло

Довжина каналу ковзного розряду залежить від його провідності, а отже, від значення струму в ньому. У свою чергу струм залежить від напруги між електродами, зміни напруги і ємності стримера щодо протилежного електрода.

Вплив цих параметрів відображено в емпіричній формулі Теплера, відповідно до якої довжина каналу ковзного розряду

$$l_{\alpha} = aC^2U^5 \sqrt{\frac{dU}{dt}}, \quad (5.1)$$

де a – коефіцієнт, знайдений дослідним шляхом; C – питома поверхнева ємність (ємність одиниці поверхні діелектрика, по якій розвивається розряд).

З (5.1) при підстановці замість l_{α} відстані між електродами по поверхні діелектрика L можна визначити значення напруги U_p , необхідного для перекриття ізолятора. Якщо ж прийняти $C = \epsilon \epsilon_0 d$, де d – товщина діелектрика, і вважати значення du/dt постійним, що в першому наближенні відповідає сталості частоти прикладеної напруги, то з (1.42) одержимо:

$$U_p = a \cdot L^{0.2} \left(\frac{d}{\epsilon \epsilon_0} \right)^{0.4} \quad (5.2)$$

З (5.2) слідує, що ріст довжини ізолятора дає відносно мале підвищення розрядної напруги. Тому для збільшення розрядних напруг прохідних

ізоляторів компенсують питому поверхневу ємність установкою екрана біля фланця, з якого можна чекати розряду. Використовується також нанесення біля фланця напівпровідного покриття, що сприяє вирівнюванню розподілу напруги по поверхні ізолятора й, отже, приводить до збільшення розрядних напруг.

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

В умовах експлуатації поверхні ізоляторів завжди забруднюються. Однак, як правило, сухі забруднення, що мають високий опір і не впливають на розподіл, по поверхні ізолятора, не знижують помітно його розрядної напруги. Зволоження шару забруднення дощем, що мрячить, або росою приводить до зменшення опору шару забруднення, зміні розподілу напруги по поверхні ізолятора, і в результаті - до зниження його розрядної напруги.

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

Під дією прикладеного до ізолятора напруги по зволоженому шарі забруднення проходить струм витoku, що нагріває його. Тому що забруднення розподілене по поверхні ізолятора нерівномірно й щільність струму витoku неоднакова на окремих ділянках ізолятора через складну конфігурацію його поверхні, то нагрівання шару забруднення відбувається також нерівномірно. На тих ділянках ізолятора, де щільність струму найбільша, забруднюючий шар тонше, відбувається інтенсивний випар води й утворюються підсушені ділянки з підвищеним опором. Розподіл напруги по поверхні ізолятора змінюється. Майже вся напруга, що впливає на ізоляцію, виявляється прикладеним до підсушених ділянок. У результаті цього підсушені ділянки перекриваються іскровими каналами, що називаються частковими дугами. Опір іскрового каналу менше опору підсушеної ділянки поверхні ізолятора, тому струм витoku зростає. Зростання струму витoku приводить до подальшого підсушування шару забруднення, а отже, і до збільшення його опору.

Інтенсивне підсушування поверхні ізолятора в кінці дуг приводить до їхнього подовження. Підсушування всієї поверхні веде до зниження струму витoku, а збільшення довжини часткових дуг - до його росту. Якщо результатом цього буде зменшення струму витoku, то дуги згаснуть, якщо ж струм витoku буде рости, то часткові дуги будуть подовжуватися й перекриють весь ізолятор. Так як, параметри часткової дуги й кількість дуг, що одночасно існують на поверхні ізолятора, випадкові, то і перекриття також є випадковою подією, що характеризується певною ймовірністю. Ймовірність

перекриття ізолятора підвищується зі збільшенням напруги, що впливає, тому що при цьому зростає струм витоку, що сприяє подовженню часткових дуг до повного перекриття ізолятора.

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

$$I_y = U_y/R, \quad (5.3)$$

де R_y – опір витоку по поверхні ізолятора.

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

$$R_y = \rho L_y / (\pi \Delta D), \quad (5.4)$$

де L_y – довжина шляху витоку.

З (5.3) і (5.4) треба, що

$$I_y = U \pi \Delta D / (\rho L_y). \quad (5.5)$$

Отже, розрядна напруга ізолятора буде зростати зі збільшенням довжини шляху витоку і зменшенням діаметра ізолятора:

$$U = \frac{I_y (\rho L_y)}{\pi \Delta D}. \quad (5.6)$$

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

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

Широке застосування в електроустановках високої напруги ізоляторів різних типів, що працюють у газовому ізоляційному середовищі, викликає

необхідність дослідження електричної міцності газів з урахуванням впливу діелектричних поверхонь. На електричну міцність повітря при поверхневому розряді впливають конфігурація електричного поля, довжина між електродного проміжку, стан поверхні діелектрика, частота прикладеної напруги.

Характер розряду і розрядні напруги по поверхні твердого діелектрика в умовах неоднорідного електричного поля в значній мірі визначаються впливом тангенціальної і нормальної складової напруженості електричного поля.

Якщо переважає тангенціальна складова напруженості електричного поля (рис. 5.4, а, в), то розрядні напруги по поверхні близькі до пробивних напруг повітряних проміжків між аналогічними за формою електродами.

У випадку значної нормальної складової напруженості електричного поля (рис. 5.4, г, д) розряд по поверхні має ряд особливостей. При відносно невеликих напругах спостерігається корона біля електродів. Ріст напруги супроводжується появою каналів (стрімерів), які слабо світяться і при подальшому підвищенні напруги перетворюються в ковзні розряди, що характеризуються інтенсивним світінням. У ковзних розрядах протікає значний струм, обумовлений процесом іонізації повітря і залежний від ємності каналу ковзного розряду стосовно протилежного електрода.

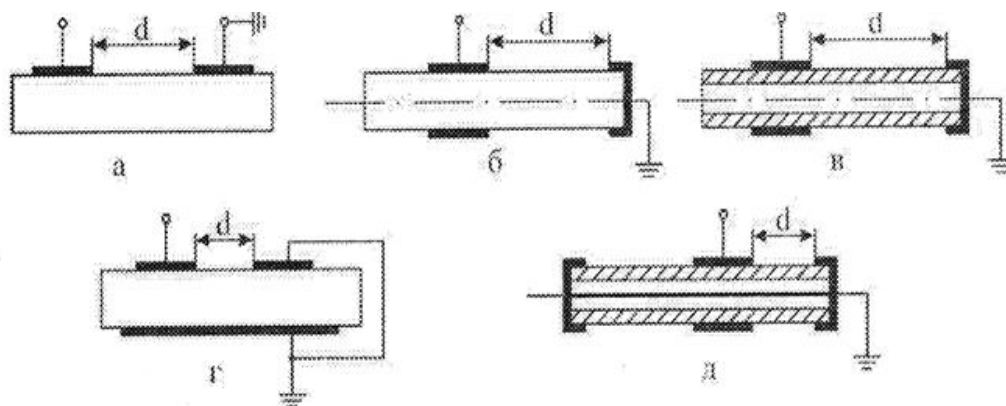


Рис. 5.4. Іскрові проміжки для дослідження нормальної (а, б, в) та тангенційної (г, д) складової перекриття по поверхні твердого діелектрика.

За Теплером ковзний розряд, що являє собою неповний поверхневий розряд, виникає при напрузі (кВ):

$$U_c = 1,355 \times 10^4 / C_n^{0,44}, \quad (5.7)$$

де C_n – питома поверхнева ємність, тобто ємність 1 см² поверхні, по якій розвивається розряд, стосовно протилежного електрода, Ф/см².

При невеликій товщині діелектрика питома поверхнева ємність для випадку плоского конденсатора (Ф/см²):

$$C_n = \epsilon_0 \epsilon / \Delta, \quad (5.8)$$

де Δ – товщина діелектрика, см;

ϵ – відносна діелектрична проникність діелектрика;

ϵ_0 – відносна діелектрична проникність у вакуумі.

Звідси формула (5.7) перетвориться до виду:

$$U_c = 74,8 (\Delta / \epsilon)^{0,45}. \quad (5.9)$$

Завдяки малим опорів і падінню напруги на каналах ковзних розрядів потенціал електрода вноситься всередину проміжку, і розвиток розряду полегшується.

Подальше підвищення прикладеної напруги приводить до швидкого подовження ковзних розрядів, і процес завершується повним перекриттям проміжку між електродами. Напруга поверхневого перекриття завжди нижче напруги пробою повітряного проміжку того ж розміру.

Приблизно розрядна напруга по поверхні виражається так:

$$U_p = k (\Delta / \epsilon)^m d^n, \quad (5.10)$$

де d – відстань між електродами по поверхні, см;

k, m, n – коефіцієнти, що залежать від особливостей конструкції ізоляційного проміжку і діапазону зміни відстані d .

Зволоження і забруднення поверхні діелектрика різко знижують величину розрядної напруги.

В ізоляційних конструкціях для підвищення розрядної напруги збільшують розрядну відстань по поверхні за рахунок спідниць і ребер на ізоляторі.

5.3 Описання експериментальної установки

Принципова схема лабораторного стенда представлена на рис. 5.5.

Стенд живиться від мережі напругою 220 В. Напруга надходить на видимий розрив QS1, з якого – на автомат QF1, який захищає вхідні ланцюги живлення від струму короткого замикання. При включенні автомату світиться табло "Напруга". Далі, якщо перемикач SA1 знаходиться в правому положенні (дивлячись на схему), а це означає, що в захисному огороженні штанга із переносним заземленням висить на ньому, і якщо замкнутий перемикач SA2, тобто закриті двері огороження, то вхідна напруга подається на комутаційну апаратуру стенда. В такому разі, включивши кнопку SB2 ("Пуск"), включиться контактор KM1. Контактор своїми контактами KM1.1 і KM1.2 подасть вхідну напругу на регулятор напруги TV1, тим самим включить табло "Висока напруга". Контакт KM1.3 служить для блокування кнопки SB2. Запобіжник FU1 захищає ланцюги керування стендом.

З регулятора напруги TV1 напруга надходить на первинну обмотку силового трансформатора TV2. Вимірювальні прилади (амперметр PA1 і вольтметр PV1) призначені для контролю вхідної напруги та струму споживання трансформатора TV2. Величину вторинної напруги вимірюємо за допомогою кіловольтметра PV2.

Варто пам'ятати, що при вимірах одержують діючі значення змінної напруги.

Системи електродів SE різної форми закріплюються за допомогою з'єднань XT1 і XT2. Водяний резистор R1 обмежує розрядний струм, тим самим захищаючи трансформатор TV2 від перевантаження по струму.

Кнопка SB2 ("Стоп") виключає живлення контактора KM1, а тим самим і живлення регулятора напруги TV1.

Коли перемикач SA1 знаходиться в лівому положенні (дивлячись на

схему), а це означає, що в захисному огороженні штанга із переносним заземленням не висить на ньому, світитиметься табло "Заземлено" і включення стенда неможливе. Стенд також не включиться, якщо розімкнений перемикач SA2, тобто відкриті двері.

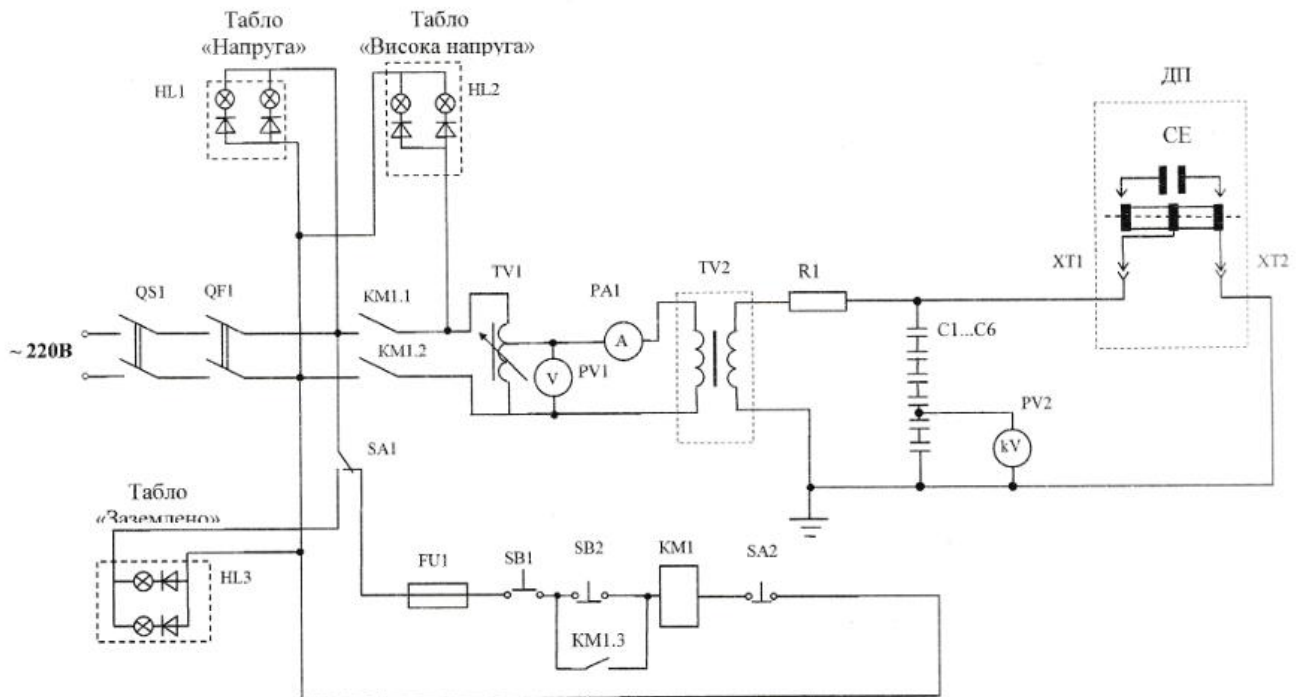


Рис. 5.5. Схема експериментальної установки

5.4. Підготовка стенда до роботи і методика виконання лабораторної роботи

1. Отримати допуск до роботи, розписатись в журналі з техніки безпеки при виконанні робіт у високовольтній лабораторії.
2. Включити видимий розрив.
3. Включити автомат (світиться табло "Напруга" і світловий зайчик кіловольтметра).
4. Вдягнувши діелектричні рукавиці, відкрити двері захисної огорожі.
5. За допомогою діелектричної штанги наложити захисне заземлення на високовольтний трансформатор (світиться табло "Заземлено").

6. Підключити потрібну систему електродів (плоскі або коаксіальні) на дослідній поверхні (ДП).

7. Виставити відстань між цими електродами за шаблоном.

8. За допомогою діелектричної штанги зняти захисне заземлення з високовольтного трансформатора.

9. Діелектричну штангу повісити на місце (на вимикач).

10. Закрити двері захисного огороження.

11. Зняти діелектричні рукавиці.

12. Переконайтесь в наявності діелектричного килимка перед пультом.

13. Регулятор напруги "ЛАТР" вивести в нуль (крайнє ліве положення).

14. Включати кнопку "ПУСК" (світиться табло "Висока напруга").

15. Повертаючи ручку "ЛАТР" вправо, добиватися розряду між електродами по поверхні діелектрика, і як тільки розряд розпочався, відразу натиснути кнопку "Стоп", зафіксувавши наочно величину пробивної напруги на кіловольтметрі PV2.

Для кожного ізоляційного проміжку величина пробивної напруги визначається за даними п'яти вимірів з наступною їхньою обробкою згідно із завданням. Покази вольтметра фіксувати в момент повного перекриття ізоляційного проміжку першим іскровим каналом, після чого іспитовий трансформатор відключити з пульта керування. Потім дослід повторити.

Для зміни відстані між електродами відключити рубильником видимого розриву іспитовий трансформатор TV2 і накласти заземлення на його високовольтний вивід. Блоки-контакти дверей стенда унеможливають подачу напруги на лабораторний стенд при відкритих дверях.

Дотримуючись вказаних пунктів, згідно із завданням, встановити іншу конфігурацію електродів.

5.5 Завдання

1. При підготовці до виконання лабораторної роботи ознайомитися з правилами техніки безпеки (досконало вивчити інструкцію №155, яка

знаходиться в лабораторії), зі схемою установки, розміщенням її елементів, методикою проведення роботи на експериментальному стенді та основними теоретичними положеннями електричного розряду по поверхні твердих діелектриків.

2. Експериментально одержати значення напруги початку ковзних розрядів для схем рис. 5.4, г, д. Для схеми на рис. 6.4, а кільцевий електрод установити посередині трубки. Зіставити результати з розрахованими. Результати занести в табл. 6.1.

Таблиця 4.1. Значення напруг початку ковзних розрядів

Іскровий проміжок	U _c , кВ						
	U ₁	U ₂	U ₃	U ₄	U ₅	U _{ср}	U _p
Схема рис. 2.1, г							
Схема рис. 2.1, д							

3. Експериментально одержати значення напруг U_p повного перекриття по поверхні скла, порцеляни (рис. 5.4) при відстанях d = 0...5 см між електродами (*). Результати занести в табл. 5.2. За даними табл. 5.2 побудувати графічні залежності U_p = f(d). На одному графіку показати залежності U_p = f(d) і E_{ср} = f(d) для випадків рис. 5.4, а – в, на іншому – для випадків рис. 5.4. г, д.

4. Для розрядних напруг у досліджуваному інтервалі відстаней установити аналітичні залежності U_p = f(d) і за ними побудувати розрахункові криві.

Таблиця 5.2. Значення напруг повного перекриття по поверхні твердих діелектриків

Іскровий проміжок	d, см	U _p , кВ						E _{ср} , кВ/см
		U ₁	U ₂	U ₃	U ₄	U ₅	U _{ср}	

5. Детально проаналізувати результати експерименту, звернувши особливу увагу на величини середніх розрядних напруженостей електричного

поля при відсутності і наявності нормальної складової і їхню залежність від відстані між електродами.

Для рис. 5.4 д досліди провести для двох значень нормальної складової напруженості електричного поля.

Контрольні запитання

1. Як визначається питома поверхнева ємність ізоляційної конструкції? Як впливає величина питомої поверхневої ємності на величину початку ковзних розрядів?

2. З якими реальними ізоляційними конструкціями можна зіставити досліджувані в роботі іскрові проміжки?

3. Чи будуть розрізнятися напруги поверхневого розряду у випадках двох прохідних ізоляторів з однаковою довжиною розрядного шляху по поверхні d , але з різними діаметрами?

4. Які чисельні значення середніх розрядних напруженостей за даними проведених дослідів? Про що це говорить?

5. Які відомі методи збільшення поверхневої електричної міцності в ізоляційних конструкціях?

6. Як визначити сухо- і мокро розрядну напругу?

Лабораторна робота № 6

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ ПОВІТРЯ ПРИ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРИЧНОГО РОЗРЯДУ ПО ПОВЕРХНІ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ НАПРУГОЮ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

6.1. Мета роботи: дослідити електричну міцність повітря з різною конфігурацією електричного поля при розвитку розряду по поверхні твердого діелектрика в іскрових проміжках на напруг постійного струму .

6.2 Описання експериментальної установки

Принципова схема лабораторного стенда представлена на рис. 6.1.

Стенд живиться від мережі напругою 220 В. Напруга надходить на видимий розрив QS1, з якого – на автомат QF1, який захищає вхідні ланцюги живлення від струму короткого замикання. При включенні автомату світиться табло "Напруга". Далі, якщо перемикач SA1 знаходиться в правому положенні (дивлячись на схему), а це означає, що в захисному огороженні штанга із переносним заземленням висить на ньому, і якщо замкнутий перемикач SA2, тобто закриті двері огороження, то вхідна напруга подається на комутаційну апаратуру стенда. В такому разі, включивши кнопку SB2 ("Пуск"), включиться контактор KM1. Контактор своїми контактами KM1.1 і KM1.2 подасть вхідну напругу на регулятор напруги TV1, тим самим включить табло "Висока напруга". Контакт KM1.3 служить для блокування кнопки SB2. Запобіжник FU1 захищає ланцюги керування стендом.

З регулятора напруги TV1 напруга надходить на первинну обмотку силового трансформатора TV2. Вимірювальні прилади (амперметр PA1 і вольтметр PV1) призначені для контролю вхідної напруги та струму споживання трансформатора TV2. Величину вторинної напруги вимірюємо за допомогою кіловольтметра PV2.

Варто пам'ятати, що при вимірах одержують діючі значення змінної напруги.

Системи електродів CE різної форми закріплюються за допомогою з'єднань XT1 і XT2. Водяний резистор R1 обмежує розрядний струм, тим самим захищаючи трансформатор TV2 від перевантаження по струму.

Кнопка SB2 ("Стоп") виключає живлення контактора KM1, а тим самим і живлення регулятора напруги TV1.

Коли перемикач SA1 знаходиться в лівому положенні (дивлячись на схему), а це означає, що в захисному огороженні штанга із переносним заземленням не висить на ньому, світитиметься табло "Заземлено" і включення стенда неможливе. Стенд також не включиться, якщо розімкнений перемикач SA2, тобто відкриті двері.

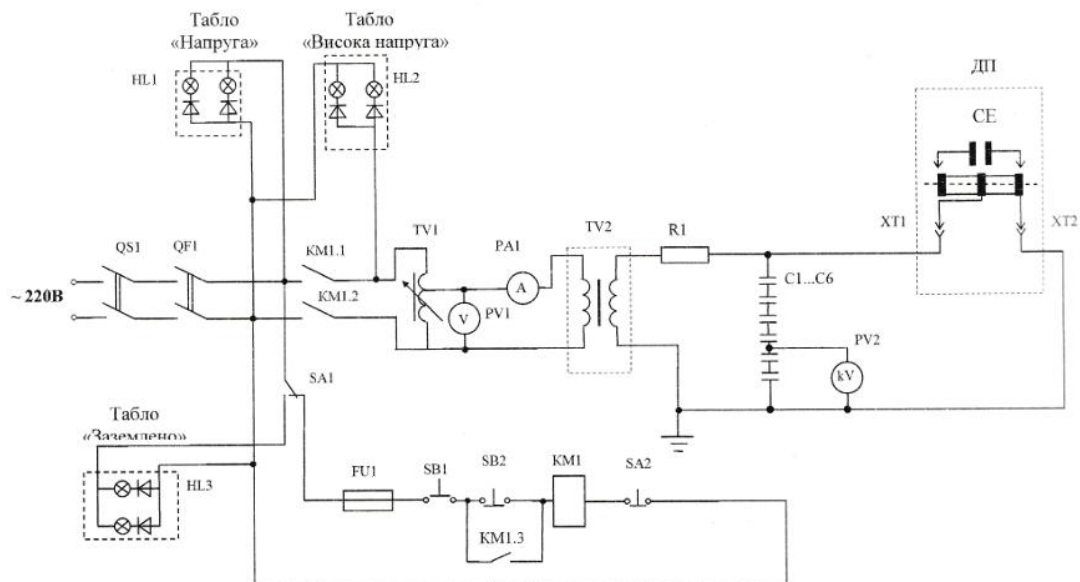


Рис. 6.5. Схема експериментальної установки

6.3. Підготовка стенда до роботи і методика виконання лабораторної роботи

1. Отримати допуск до роботи, розписатись в журналі з техніки безпеки при виконанні робіт у високовольтній лабораторії.
2. Включити видимий розрив.
3. Включити автомат (світиться табло "Напруга" і світловий зайчик кіловольтметра).
4. Вдягнувши діелектричні рукавиці, відкрити двері захисної огорожі.

5. За допомогою діелектричної штанги наложити захисне заземлення на високовольтний трансформатор (світиться табло "Заземлено").
6. Підключити потрібну систему електродів (плоскі або коаксіальні) на дослідній поверхні (ДП).
7. Виставити відстань між цими електродами за шаблоном.
8. За допомогою діелектричної штанги зняти захисне заземлення з високовольтного трансформатора.
9. Діелектричну штангу повісити на місце (на вимикач).
10. Закрити двері захисного огороження.
11. Зняти діелектричні рукавиці.
12. Переконайтесь в наявності діелектричного килимка перед пультом.
13. Регулятор напруги "ЛАТР" вивести в нуль (крайнє ліве положення).
14. Включати кнопку "ПУСК" (світиться табло "Висока напруга").
15. Повертаючи ручку "ЛАТР" вправо, добиватися розряду між електродами по поверхні діелектрика, і як тільки розряд розпочався, відразу натиснути кнопку "Стоп", зафіксувавши наочно величину пробивної напруги на кіловольтметрі PV2.

Для кожного ізоляційного проміжку величина пробивної напруги визначається за даними п'яти вимірів з наступною їхньою обробкою згідно із завданням. Покази вольтметра фіксувати в момент повного перекриття ізоляційного проміжку першим іскровим каналом, після чого іспитовий трансформатор відключити з пульта керування. Потім дослід повторити.

Для зміни відстані між електродами відключити рубильником видимого розриву іспитовий трансформатор TV2 і накласти заземлення на його високовольтний вивід. Блоки-контакти дверей стенда унеможливають подачу напруги на лабораторний стенд при відкритих дверях.

Дотримуючись вказаних пунктів, згідно із завданням, встановити іншу конфігурацію електродів.

6.4 Завдання

5. Детально проаналізувати результати експерименту, звернувши особливу увагу на величини середніх розрядних напруженостей електричного поля при відсутності і наявності нормальної складової і їхню залежність від відстані між електродами.

Для рис. 6.4 д досліди провести для двох значень нормальної складової напруженості електричного поля.

6 Порівняти отримані результати лаб. роботи №5 та результати лаб. роботи №3 №4, №5. Детально проаналізувати різницю та пояснити причину.

Лабораторна робота № 7.

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ НАПРУГИ ПО ГІРЛЯНДІ ІЗОЛЯТОРІВ

7.1. Мета роботи: вивчити експериментальну методику визначення розподілу змінної напруги по гірлянді ізоляторів за допомогою іскрового проміжку з незмінною відстанню між кулями та способи вирівнювання розподілу напруги.

7.2. Теоретичні положення

Для ізоляції проводів повітряних ліній електропередачі (ЛЕП) напругою 35 кВ і більше застосовуються гірлянди ізоляторів. Розподіл напруги по ізоляторах гірлянди не рівномірний. Якщо не прийняти спеціальних заходів з вирівнювання розподілу напруги, то найближчі до проводу ізолятори виявляться під впливом напруги, що перевищує напругу початку корони, зростуть втрати енергії і радіоперешкоди.

Правила улаштування електроустановок передбачають при відсутності підвищених забруднень наступну кількість елементів у гірлянді при різних номінальних напругах, наведену в табл. 7.1.

6.1. Кількість відповідного типу ізоляторів у гірлянді при різних номінальних напругах

Номінальна напруга ЛЕП, кВ	35	110	150	220	330	500
Кількість ізоляторів типу ПФ-6А	3	7	9	13	19	–
Кількість ізоляторів типу ПФ-16А	–	6	8	11	17	23
Кількість ізоляторів типу ПФ-20А	–	–	–	10	14	20

На рис. 7.1 наведена схема заміщення гірлянди, на якій ізолятори представлені ланцюжком рівних ємностей C_3 , шунтованих опорами витоку по поверхні, а ємності металевих елементів щодо заземлених деталей, наприклад, опори, троса і фазного проводу, позначені відповідно C_1 і C_2 .

Величина ємності C_3 підвісних порцелянових ізоляторів коливається в межі 30...70 пФ, $C_1 = 4...5$ пФ; $C_2 = 1$ пФ.

Опір витоку R сухого ізолятора значно перевищує ємнісний опір $1/\omega C_3$ елемента гірлянди і тому при аналізі розподілу напруги по сухій гірлянці ізоляторів не враховується.

Якщо у схемі рис. 7.1 врахувати тільки ємність C_3 і C_1 , то струми в ланцюгу конденсаторів C_3 підкорятимуться нерівності:

$$I_1 > I_2 > I_3 > \dots \quad (7.1)$$

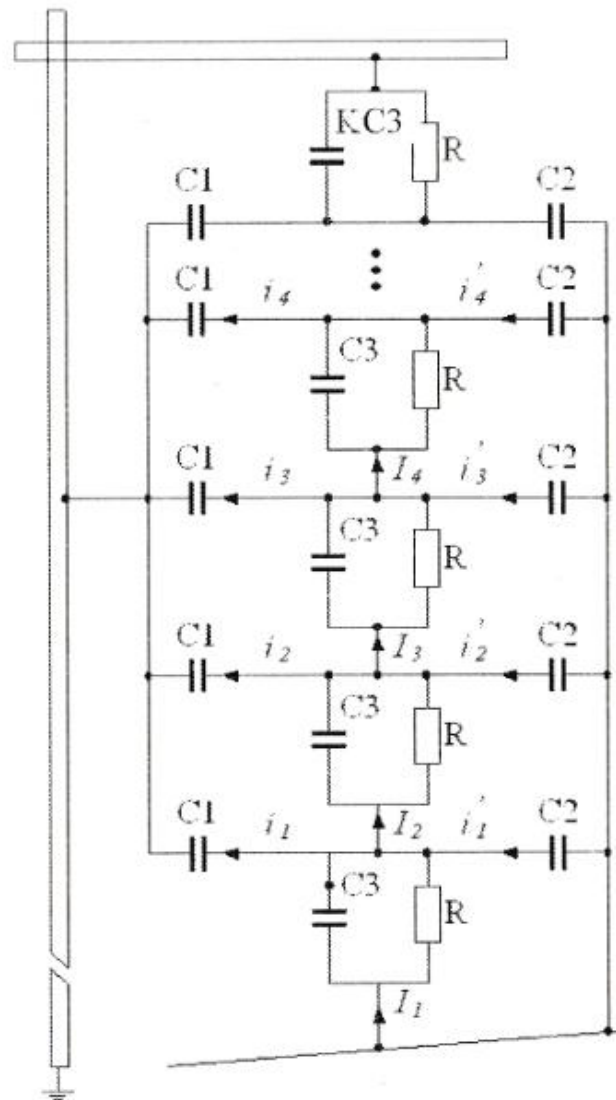


Рис. 7.1. Схема заміщення гірлянди ізоляторів

При рівності ємностей СЗ це приведе до росту напруги на найближчих до проводу елементах гірлянди:

$$U_1 > U_2 > U_3, > \dots . \quad (7.2)$$

Якщо ж враховувати при аналізі тільки ємність СЗ і С2, то мають місце нерівності:

$$U_1 < U_2 < U_3 < \dots, \quad (7.3)$$

$$I_1 < I_2 < I_3 < \dots . \quad (7.4)$$

Отже, протікання ємнісних струмів витоку по конденсаторах С1 приводить до росту напруги на найближчих до проводу елементах гірлянди, а протікання струмів i_i^l – до росту напруги на віддалених від проводу елементах. Так як $C_1 > C_2$, то на розподіл напруги по довжині гірлянди більший вплив роблять ємності на землю.

Напруга на i -му ізоляторі гірлянди, рахуючи від проводу:

$$\Delta U_i = U_{i-1} - U_i = \frac{U_0}{(C_1 + C_2)sh\alpha n} \{C_1 [sh\alpha(n - i + 1) - sh\alpha(n - i)] + C_2 [sh\alpha i - sh\alpha(i - 1)]\}. \quad (7.5)$$

У найбільш складних умовах працює найближчий до проводу ізолятор, напруга на якому:

$$\Delta U_1 = \frac{U_0}{C_1 + C_2} \left\{ C_1 \left[1 - \frac{sh\alpha(n - 1)}{sh\alpha n} \right] + C_2 \frac{sh\alpha}{sh\alpha n} \right\} \quad (7.6)$$

У виразах (6.5), (6.6):

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{C_3}} \quad (7.7)$$

де n – кількість елементів у гірлянді.

Вирівнювання напруги по елементах гірлянди може бути досягнуто збільшенням власних ємностей елементів, встановленням біля проводу ізолятора з підвищеним значенням власної ємності, підвіскою біля проводу двох паралельно з'єднаних елементів, застосуванням металевої арматури з боку проводу, збільшенням ємностей С2 за рахунок розщеплення проводів ЛЕП.

У лабораторних умовах вимір розподілу напруги по гірлянді при змінній напрузі на проводі робиться за допомогою кульового розрядника з незмінною відстанню між електродами. Вимірювальний розрядник не повинен вносити істотних змін в електричне поле гірлянди і характеризуватися ємністю, меншою ємності окремого елемента гірлянди.

Розрядник по черзі підключається паралельно кожному елементу гірлянди. До проводу підводиться напруга від дослідного трансформатора, яка підвищується до пробою іскрового проміжку.

Якщо U_p – пробивна напруга розрядника, а U_i – напруга, підведена до проводу, при якому відбувся пробій іскрового проміжку розрядника, закріпленого на i -му ізоляторі гірлянди, то для падіння на кожному ізоляторі:

$$a_1 = \frac{U_p}{U_1} \cdot 100 \quad (7.8)$$

$$a_2 = \frac{U_p}{U_2} \cdot 100 \quad (7.9)$$

$$a_i = \frac{U_p}{U_i} \cdot 100$$

Підставляючи розрядні напруги, знаходимо:

$$a_2 = a_1 \frac{U_1}{U_2} \quad (7.10)$$

$$a_i = a_1 \frac{U_1}{U_i}$$

Враховуючи, що:

$$a_1 + a_2 + \dots + a_i + \dots + a_n = 100, \quad (7.11)$$

отримаємо:

$$a_1 + \frac{U_1}{U_2} a_1 + \frac{U_1}{U_3} a_1 + \dots + \frac{U_1}{U_n} a_1 = 100. \quad (7.12)$$

Звідки

$$a_1 = \frac{100}{1 + \frac{U_1}{U_2} + \frac{U_1}{U_3} + \dots + \frac{U_1}{U_n}}. \quad (7.14)$$

Аналогічно можна отримати вирази:

$$a_2 = \frac{100}{1 + \frac{U_2}{U_1} + \frac{U_2}{U_3} + \dots + \frac{U_2}{U_n}}, \quad (7.15)$$

$$a_i = \frac{100}{1 + \frac{U_i}{U_1} + \frac{U_i}{U_2} + \dots + \frac{U_i}{U_n}}$$

Запропонована методика виміру справедлива при дотриманні основного допущення про незалежність характеру розподілу напруги по гірлянді від величини прикладеної до проводу напруги. Тут не враховується вирівнювальна дія на розподіл напруги по гірлянді корони на проводі ЛЕП і в місцях зчленування елементів гірлянди. Визначення розподілу напруги по гірлянді порцелянових ізоляторів використовується для виявлення дефектних ізоляторів. Напряга на дефектному (пробитому) ізоляторі значно знижується.

Якщо розрядник підключений паралельно дефектному ізолятору, що має номер i (рахунок ведеться від проводу до траверси), то напруга на проводі U_i , при якому настає пробій розрядника, значно зростає.

Вимірювальна штанга. У польових умовах вимірювання розподілу по гірлянді і виявлення дефектних ізоляторів проводиться за допомогою вимірювальної штанги. Для цього кінцем штанги дотикаються до металевої арматури ізолятора гірлянди. Потім, повільно повертаючи рукоятку, домагаються пробою змінного іскрового проміжку і за попередньо проградуєваною шкалою визначають напругу, що приходить на вимірюваний елемент гірлянди. Рукоятка штанги зв'язана з рухливим

електродом іскрового проміжку. При пробої іскрового проміжку штанга не шунтує вимірюваний елемент завдяки високовольтному конденсатору, включеному послідовно з іскровим проміжком. Випробування ізоляції штанги проводиться не менше одного разу на рік.

Електростатичний вольтметр типу С-196. Для вимірювання напруги, прикладеної до гірлянди, у роботі використовується кіловольтметр типу С-196. Він являє собою трьох граничний лабораторний прилад електростатичної системи зі світловим відліком. Електростатичний вплив виникає між рухомих і нерухомих електродами, що знаходяться під різними потенціалами. Нерухомий електрод укріплений на опорному ізоляторі. На другому опорному ізоляторі розміщений екран з отвором, усередині якого знаходиться рухомий електрод, укріплений на розтяжках.

Кіловольтметра типу С-196 служать для вимірювання напруги постійного струму і діючого значення напруги змінного струму частотою 45-500000 Гц у ланцюгах з одним заземленим полюсом. При цьому як електрод з вимірювальним механізмом, так і підстава приладу повинні бути заземлені.

Межі вимірювань приладу: 7,5, 15 і 30 кВ. Вхідна ємність – не більше $18 \cdot 10^{-12}$ Ф, час затухання коливань рухливої частини приладу – не більше 6 с, опір ізоляції вимірювального ланцюга при постійній напрузі – не менше 10^{10} Ом.

На електроді з вимірювальним механізмом розміщені: ручка перемикача шкал, головка коректора, затискач для заземлення і рукоятка засувки, що закриває отвір для рухомого електрода в неробочому стані приладу. Високовольтний затискач розміщений на нерухомому електроді.

Перехід з однієї межі вимірювань на іншу здійснюється зміною відстані між електродами. Крім того, за допомогою спеціальної ручки на бічній стороні електрода з вимірювальним механізмом здійснюється зміна шкали, за якою виконується відлік.

Для збільшення чутливості прилад оснащений світловим відліком. Установка світлового зображення покажчика на нульову оцінку шкали

встановлюється коректором, головка якого виведена на передню сторону корпусу.

7.3 Описання експериментальної установки

Принципова схема лабораторного стенда представлена на рис.6.2. Стенд живиться від мережі напругою 220 В. Напруга приходиться на видимий розрив QS1, з якого – на автомат QF1, який захищає вхідні ланцюги живлення від струму короткого замикання. При включенні автомату світиться табло "Напруга". Якщо перемикач SA1 знаходиться у правому положенні (дивлячись на схему), а це означає, що в захисному огороженні штанга із переносним заземленням висить на ньому, і якщо замкнутий перемикач SA2, тобто закриті двері огороження, то вхідна напруга подається на комутаційну апаратуру стенда. В такому разі, натиснувши кнопку SB2 ("Пуск"), включиться контактор KM1. Контактор своїми контактами KM1.1 і KM1.2 подасть вхідну напругу на регулятор напруги TV1, тим самим включить табло "Висока напруга". Контакт KM1.3 призначений для блокування кнопки SB2. Запобіжник FU1 захищає ланцюги керування стендом.

З регулятора напруги TV1 напруга надходить на первинну обмотку силового трансформатора TV2. Вимірювальні прилади (амперметр PA1 і вольтметр PV1) слугують для контролю вхідної напруги та струму споживання трансформатора TV2. Вторинну напругу вимірюють за допомогою кіловольтметра PV2. Водяний резистор R1 обмежує розрядний струм, захищаючи трансформатор TV2 від перевантаження по струму. Кнопка SB2 ("Стоп") виключає живлення контактора KM1, а тим самим і живлення регулятора напруги TV1.

Коли перемикач SA1 знаходиться в лівому положенні (дивлячись на схему), а це означає, що в захисному огороженні штанга із переносним заземленням не висить на ньому, світитиметься табло "Заземлено", і включення стенда неможливе. Стенд також не включиться, якщо буде розімкнено перемикач SA2, тобто будуть відкриті двері.

7.4. Підготовка стенда до роботи і методика виконання лабораторної роботи

1. Отримати допуск до роботи, розписатись у журналі з техніки безпеки при виконанні робіт у високовольтній лабораторії.
2. Включити видимий розрив.
3. Включити автомат (горить табло "Напруга" і світловий зайчик кіловольтметра).
4. Вдягнувши діелектричні рукавиці, відкрити двері захисної огорожі.
5. За допомогою діелектричної штанги наложити захисне заземлення на високовольтний трансформатор (горить табло "Заземлено").
6. Підключити гірлянду ізоляторів.
7. Встановити розрядник на нижній ізолятор гірлянди.
8. За допомогою діелектричної штанги зняти захисне заземлення з високовольтного трансформатора.
9. Діелектричну штангу повісити на місце (на вимикач).
10. Закрити двері захисного огородження.
11. Зняти діелектричні рукавиці.
12. Переконайтесь в наявності діелектричного килимка перед пультом.
13. Регулятор напруги "ЛАТР" вивести в нуль (крайнє ліве положення).
14. Включити кнопку "ПУСК" (світиться табло "Висока напруга").
15. Повертаючи ручку "ЛАТР" вправо, добитися розряду між електродами розрядника, зафіксувавши наочно величину пробивної напруги на кіловольтметрі PV2.

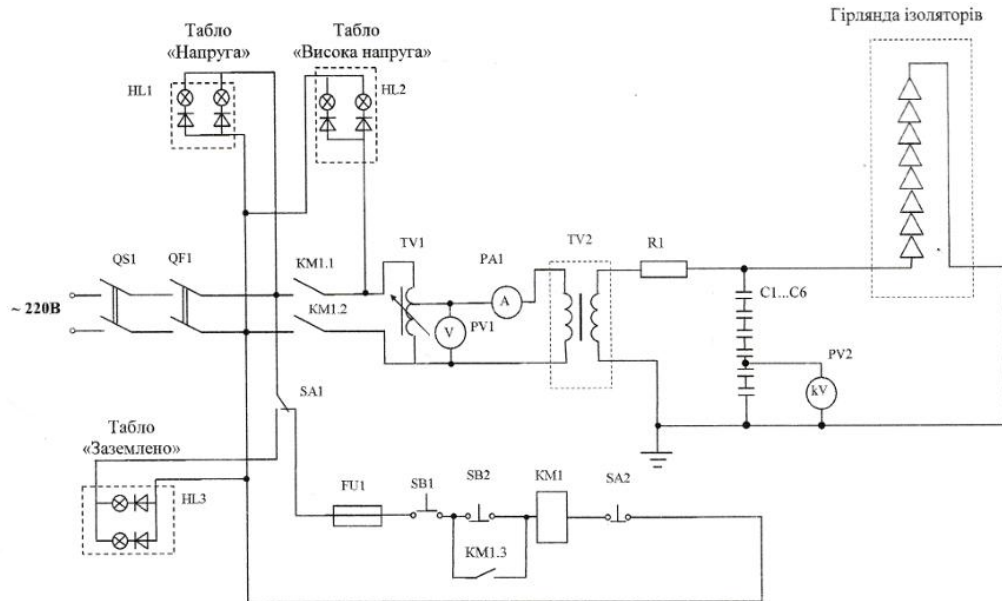


Рис. 7.2. Схема експериментальної установки

Доступ до гірлянди ізоляторів, розміщеної на дослідному полі, можливий тільки при цілком відключеній установці і накладенні переносного заземлення на вивід вторинної обмотки трансформатора TV2. Перед виходом на дослідне поле для закріплення розрядника на ізоляторі гірлянди варто переконатися в тому, що ручка автотрансформатора "Латр" відповідає положенню "0", тобто на первинну обмотку іспитового трансформатора не надходить напруга, а рубильник видимого розриву і контактори відключені. За допомогою спеціальної штанги на вивід трансформатора накладається захисне заземлення. Розрядник установлюється на першому, найближчому до проводу, елементі гірлянди із семи ізоляторів. Залишаючи дослідне поле, потрібно зняти захисне заземлення і щільно закрити за собою двері. Включити установку. Плавню підвищувати напругу до пробного іскрового проміжку. Дослід повторити 3–5 разів, після чого переставити розрядник на наступний елемент гірлянди. Результати вимірів занести в табл. 7.2. У розрахункові формули (7.16) – (7.18) підставити середні значення напруг.

Таблиця 7.2. Результати вимірів

	Номер ізолятора						
	1	2	3	4	5	6	7
Напруга, кВ							

7.5. Завдання

1. При підготовці до виконання лабораторної роботи ознайомитися з правилами техніки безпеки (досконало вивчити інструкцію №155, яка знаходиться в лабораторії), зі схемою установки, розташуванням її елементів, методикою проведення роботи.

2. Визначити розподіл змінної напруги по гірлянді із семи елементів.

3. Визначити розподіл напруги по гірлянді з арматурою, що вирівнює, у виді кільця.

4. Визначити, як зміниться розподіл напруги по гірлянді при одному закороченому елементі. Результати вимірів занести в таблицю, аналогічну табл. 3.2.

5. Результати, отримані в пп. 3 – 5, сполучити на загальному графіку.

6. Ознайомитися з інструкцією і призначенням окремих елементів вимірювальної штанги і кіловольтметра типу С – 196.

Контрольні запитання

1. При дотриманні якого допущення справедливі формули (3.16) – (3.18)?

2. Чому розподіл змінної напруги по гірлянді однотипних ізоляторів нерівномірний?

3. Чим пояснити більш рівномірний розподіл напруги по гірлянді ізоляторів при постійній напрузі на проводі?

4. Як і чому зміниться розподіл напруги по гірлянді ізоляторів при короні?

5. Як змінюється розподіл напруги при зволоженні ізоляторів гірлянди?

6. У гірлянду порцелянових ізоляторів пропонується встановити однотипний скляний ізолятор. У якому місці гірлянди встановити його для більш рівномірного розподілу напруги?

7. З яких розумінь вибирається кількість елементів у гірлянді ЛЕП змінного струму?

8. Як впливають розщеплення проводу і захисна арматура на розподіл напруги по гірлянді? Чим обумовлений цей вплив?

Лабораторна робота № 8.
ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ
ПОВІТРЯНИХ ПРОМІЖКІВ

8.1. Мета роботи: дослідити імпульсну електричну міцність повітряних проміжків при різних відстанях між електродами в однорідному і неоднорідному електричному полях у випадках позитивної і негативної полярності прикладеного імпульсу.

9.2. Теоретичні положення

У практиці експлуатації, при конструюванні і виготовленні високовольтного електроустаткування необхідно враховувати можливість впливу на нього перенапруг, викликаних розрядами атмосферної електрики. Такі впливи супроводжуються виникненням імпульсних хвиль напруги, що приводять до електричного пробою ізоляції електроустаткування. Тому необхідно знати імпульсну електричну міцність ізоляційних проміжків, що у даний час визначається винятково на підставі експериментальних даних.

Явище електричного пробою пов'язане з електронними процесами в діелектрику, що виникають у сильному електричному полі і призводять до раптового (різкого) місцевого зростання щільності електричного струму до моменту пробою. Якщо діелектрик знаходиться в електричному полі і коли його напруженість перевищить критичне значення $E > E_{кр}$, то діелектрик втрачає властивості електроізоляційного матеріалу. Це явище має назву пробою діелектрика або порушення його електричної міцності. Значення напруги, при якій відбувається пробій діелектрика, називається пробивною напругою ($U_{пр}$), а відповідне значення напруженості поля – електричною міцністю діелектрика ($E_{пр}$):

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h}, \quad (8.1)$$

де h – товщина діелектрика $[1\text{МВ/м}] = [1\text{кВ/мм}] = [10^6\text{ В/м}]$.

Зовнішньою ізоляцією в багатьох видах електричних конструкцій, наприклад, в трансформаторах, конденсаторах, на лініях електропередачі є повітря. Електрична міцність повітря в нормальних умовах невелика порівняно з Епр рідких і твердих діелектриків.

У газі тепловий рух іонів при накладанні поля отримує деяку додаткову енергію:

$$W = q \cdot U_{\lambda} \quad (8.2)$$

Де W – енергія заряджених частинок газу;

q – заряд;

U_{λ} – падіння напруги на довжині вільного пробігу λ .

При однорідному полі $U_{\lambda} = E \times \lambda$, де E – напруженість поля. Тоді:

$$W = q \cdot E \lambda \quad (8.3)$$

Енергія заряджених частинок при зіткненні передається молекулам газу. Якщо вона достатньо велика, відбувається збудження атомів і молекул, пов'язане з переходом електронів на більш віддалену від ядра орбіту, або їх розщеплення на електрони і позитивні іони. При цьому умовою іонізації є:

$$q \cdot E \lambda \geq W_i \quad (8.4)$$

Енергію іонізації W_i часто характеризують іонізаційним потенціалом :

$$U_i = \frac{W_i}{q} \quad (8.5)$$

Іонізаційний потенціал для різних газів знаходиться в межах від 4 до 25 В, що відповідає енергії іонізації від 4 ÷ 25 еВ.

При заданих значеннях тиску газу і температури ударна іонізація починається при певному значенні напруженості поля. Ця напруженість поля E називається початковою напруженістю.

Явище пробую газу залежить від ступеня однорідності електричного поля, в якому здійснюється пробій. Розглянемо пробій газу в однорідному полі. Однорідне поле можна отримати між плоскими електродами з заокругленими кінцями, а також між сферами великого діаметра при малій відстані між ними. У такому полі пробій настає миттєво при досягненні певної напруги, що залежить від температури і тиску газу. Між електродами виникає іскра, яка потім може перейти у дугу при достатній потужності джерела живлення.

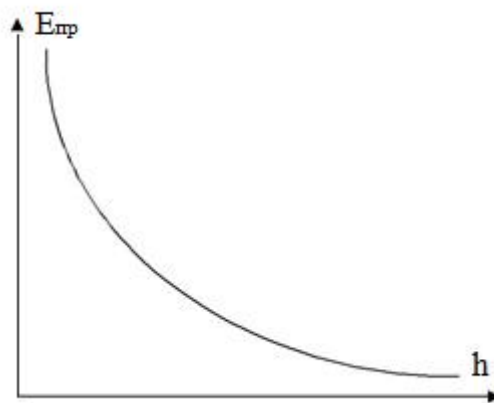


Рисунок 8.1 – Залежність електричної міцності повітря від відстані між електродами для однорідного поля

Із графіка видно, що при невеликих відстанях між електродами значно збільшується електрична міцність. Це явище пояснюється важкістю формування розряду при малій відстані між електродами.

У неоднорідному полі пробій газу відрізняються від пробую в однорідному полі. Неоднорідне поле виникає між проводами ліній електропередач, між сферичними поверхнями при відстані між ними, що перевищує радіус сфери. Особливістю пробую газу в неоднорідному полі є виникнення часткового розряду у вигляді корони у місцях, де напруженість

поля досягає критичних значень, з подальшим переходом корони в іскровий розряд і дугу при зростанні напруги.

Електрична міцність газу досить суттєво залежить від його густини (тобто від тиску, якщо температура постійна). При незначних змінах температури і тиску газу пробивна напруга пропорційна густині газу. У цьому випадку для розрахунків пробивних напруг використовується формула:

$$U_{\text{пр}} = \delta \cdot U_{\text{пр}0}, \quad (8.6)$$

де $U_{\text{пр}}$ – напруга пробою за певної температури і тиску;
 $U_{\text{пр}0}$ – напруга пробою за нормальних умов: ($t = 20$ с, $p = 0,1$ МПа);
 δ – відносна густина повітря (за нормальних умов $\delta = 1$) розраховується за формулою:

δ – відносна густина повітря (за нормальних умов $\delta = 1$) розраховується за формулою:

$$\delta = 0,386 \frac{P}{t+273^{\circ}K} \quad (8.7)$$

На рис. 8.2 наведена залежність електричної міцності газу від тиску.

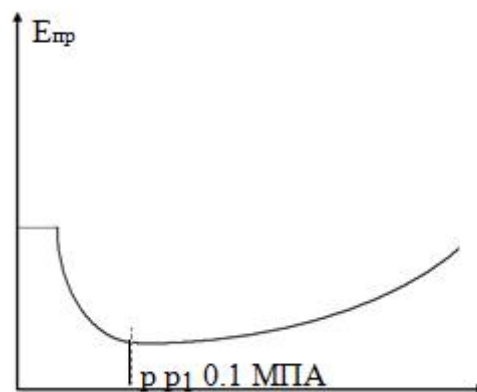


Рисунок 8.2– Залежність електричної міцності газу від тиску

При великих значеннях тиску та, відповідно, підвищеній щільності газу відстань між молекулами менша, тому і довжина вільного пробігу

електронів теж зменшується, й, згідно з умовою (8.3), для того, щоб відбувся пробій, напруженість поля має бути збільшеною.

При зменшенні тиску спочатку спостерігається падіння електричної міцності, як видно з рисунка, коли тиск доходить до певної межі, нижчої від атмосферного тиску, розрідження газу досягає високого ступеня, електрична міцність зростає. Таке зростання пояснюється зменшенням кількості молекул газу в одиниці об'єму при сильному розрідженні та, відповідно, зниженням імовірності зіткнення електронів з молекулами. У цьому випадку електрична міцність досягає достатньо високих значень. Це явище використовують для конструювання вакуумних вимикачів.

Повітря є природною ізоляцією багатьох електричних конструкцій: трансформаторів, конденсаторів, повітряних вимикачів, ліній передач.

Як діелектрик, повітря має такі позитивні властивості: швидко відновлює свою електричну міцність після пробою, незначно змінює діелектричну проникність, діелектричні втрати повітря практично дорівнюють нулю.

Негативні властивості повітря як діелектрика: погана теплопровідність, низька електрична міцність, різка її зміна біля поверхні твердого діелектрика ($E_{пр} = 2,19...2,27$ кВ/мм), здатність зволожуватись, створювати оксиди, підтримувати горіння. Електрична міцність повітря не є постійною величиною і залежить від його тиску, відносної вологості та ступеня однорідності електричного поля, в якому здійснюється пробій.

Імпульсний електричний пробій газових проміжків розвивається за тим же принципом, що й електричний пробій під дією постійної або змінної напруги. Однак амплітуда напруги при імпульсному електричному пробіі іскрового проміжку може істотно перевищувати постійну пробивну напругу того ж проміжку. Цей ефект пояснюється тим, що перед розрядний час хвилі імпульсної напруги може дорівнювати часу, необхідному для формування повного перекриття іскрового проміжку, який залежить від амплітуди

напруги, що прикладається. У цьому випадку, щоб забезпечити формування каналу електричного пробою за перед розрядний час імпульсу, потрібно збільшити амплітуду прикладеної імпульсної напруги. У лабораторних умовах ізоляційні проміжки випробовуються повними і зрізаними імпульсами напруги. Основними часовими параметрами імпульсу є:

- для повного – тривалість фронту T_f та імпульсу T_i ;
- для зрізаного імпульсу – перед розрядний час T_c .

У стандартних імпульсів, які застосовуються для перевірки ізоляції електроустаткування, часовими параметрами є: $T_f = 1,2 \pm 0,36$ мкс; $T_i = 50 \pm 10$ мкс; $T_c = 2-5$ мкс. Ці параметри визначаються графічно (рис. 8.3).

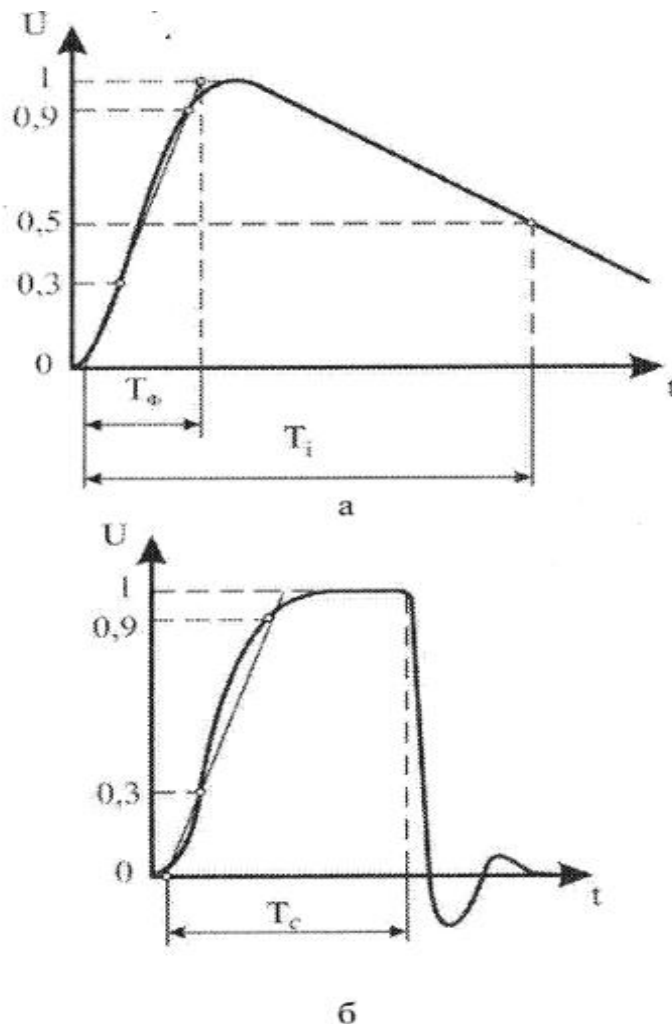


Рис. 8.3. Імпульс напруги (ГОСТ 1516-76): а – повний; б – зрізаний

У випадку дослідження ізоляційного проміжку повним імпульсом, його пробій супроводжуватиметься зрізом імпульсу з перед зарядним часом T_c (рис.8.3, б). Величина T_c залежить від часу запізнювання розряду T_z , який визначається як інтервал часу від моменту досягнення імпульсом амплітуди пробивної напруги випробовуваного проміжку U_0 при впливі постійної або змінної напруги, до моменту зрізу імпульсу (рис. 8.3, б). Час запізнювання розряду

$$T_z = T_{cm} + T_\phi, \quad (8.8)$$

де T_{cm} – статистичний час, необхідний для появи першого ефективного електрона, здатного почати іонізацію газу;

T_ϕ – час формування електричного розряду, що приводить до повного пробію проміжку.

Час запізнювання розряду в однорідних електричних полях визначається величиною T_{cm} , у неоднорідних – T_ϕ . Експериментальне дослідження величини T_z , в однорідних і неоднорідних електричних полях приводить до співвідношення:

$$T_{z,n} > T_{z,o}, \quad (8.9)$$

де $T_{z,n}$, $T_{z,o}$, – час запізнювання розряду відповідно в неоднорідному і однорідному електричних полях.

Нерівність (8.9) визначає різницю між статичною й імпульсною електричною міцністю газових проміжків в однорідних і неоднорідних електричних полях.

Імпульсна електрична міцність проміжків характеризується вольт–секундною характеристикою, що встановлює зв'язок між амплітудою імпульсу, виміряною за 50%–ним методом, при впливі якої спостерігається пробій міжелектродного проміжку з ймовірністю 50%, і часом розряду. Експериментально величина $U_{50\%}$ визначається при впливі на проміжок імпульсів генератора імпульсних напруг (ГІН).

Амплітуда імпульсів ГІН регулюється так, щоб половина їхньої вибірки приводила до іскрового розряду. Для вимірювання $U_{50\%}$ можуть

застосовуватися кульові розрядники, максимальна відстань між якими в момент розряду не перевищує їхнього діаметра. У цьому випадку електричне поле, що утвориться між ними, близьке до однорідного, що забезпечує практичну незалежність амплітуди пробивної напруги розрядників від тривалості імпульсу, який прикладається.

Вимірювання амплітуд пробивної статичної напруги U_0 та імпульсної напруги $U_{50\%}$ дозволяє визначити коефіцієнт імпульсу ізоляційного проміжку, який характеризує імпульсну міцність:

$$\beta = \frac{U_{50\%}}{U_0} \quad (8.10)$$

В однорідних електричних полях $\beta = 1$, у неоднорідних – $\beta > 1$.

8.3. Опис експериментальної установки і методика виконання роботи

Дослідження імпульсних розрядних напруг ізоляторів та іскрових проміжків між стандартними електродами виконується на стенді, принципова схема якого представлена на рис. 7.4. Основним елементом стенда є генератор імпульсних напруг ГІН, зібраний за прямою схемою з розподіленими по висоті генератора розрядними опорами. Джерелом зарядної напруги ГІН є схема подвоєння випрямленої напруги, яка складається з трансформатора Т1, напівпровідникових вентилів VD1 та VD2, трьох захисних опорів Rз і двох конденсаторів С1. Конденсатори С1 одночасно виконують функцію конденсаторів першого ступеня ГІН ($C1 = 0,24$ мкф; $U = 50$ кВ). Інші чотири ступені ГІН складені на конденсаторах типу КМ, ємністю по 0,12 мкф, напругою 100 кВ.

Подвоєння напруги в зарядному ланцюзі схеми дозволяє забезпечити необхідну величину зарядної напруги ступенів ГІН 100 кВ за допомогою трансформатора, напруга обмотки ВН якого дорівнює 50 кВ. Захисний опір розосереджений по трьох вітках схеми.

Це дозволяє заземлити один кінець обмотки ВН трансформатора і нижню кулю іскрового проміжку FS6, що при необхідності замінюється тригатроном для дистанційного керування спрацьовуванням ГН. Заряд конденсаторів ГН здійснюється через зарядні R_0 , фронтові R_ϕ і розрядні R_p опори.

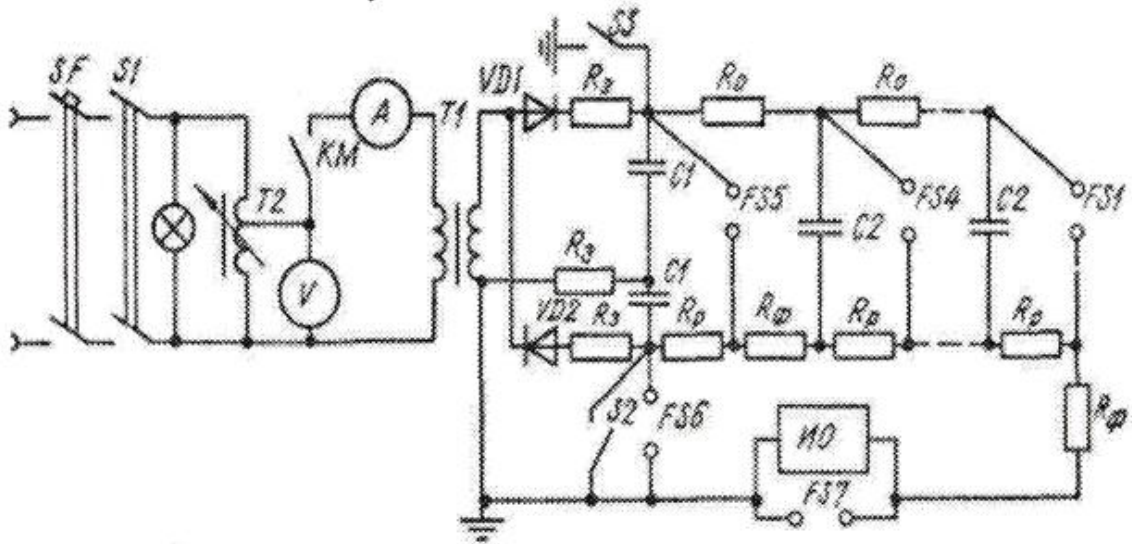


Рис. 8.4. Схема експериментальної установки

Пробі проміжків FS1 – FS6 здійснюється автоматично, починаючи з проміжку FS6. Після цього, під час заряду ємності випробовуваного об'єкта, конденсатори ступенів ГН з'єднуються послідовно через фронтові опори. Після закінчення заряду ємності випробовуваного об'єкта кожен конденсатор ступеня продовжує розряджатися через іскровий проміжок на розрядний опір ступеня, а на випробувальний об'єкт надходить сумарна напруга, знята з колони розрядних опорів.

Таким чином, основна ідея схеми ГН полягає в автоматичному переключенні конденсаторів з паралельного з'єднання при заряді на послідовне з'єднання при розряді на випробовуваний об'єкт.

На виході ГН утворюється напруга:

$$U = \eta \cdot n \cdot U_0, \quad (8.11)$$

де U_0 – напруга заряду конденсаторів ступенів;

n – кількість ступенів;

$\eta \approx 0,7$ – коефіцієнт використання ГІН.

За допомогою розрядних опорів регулюється тривалість імпульсу T_i , а за допомогою демпферно-фронтових опорів – тривалість фронту T_ϕ . Крім того, демпферно-фронтові опори R_ϕ сприяють погашенню високочастотних коливань, що спотворюють форму вихідного імпульсу.

Напруга імпульсної хвилі ГІН регулюється з пульта керування. Для збільшення, наприклад, напруги варто збільшити відстань між іскровими проміжками FS1 – FS6, після чого необхідна частота імпульсів досягається підвищенням зарядної напруги ступенів.

Вимірювання амплітуди імпульсу, що приводить до перекриття випробовуваного об'єкта, проводиться в наступній послідовності. Вимірювальні кульові розрядники FS7 розсовуються на відстань, при якій всі розряди ГІН супроводжуються або перекриттям випробовуваного об'єкта, або розрядом конденсаторів ГІН на розрядні опори.

Змінюючи відстань між іскровими проміжками FS1 – FS6 і встановлюючи за допомогою регулятора T2 частоту імпульсів приблизно один імпульс за 2 с, отримують таку напругу ГІН, при якій 50% спрацьовувань ГІН завершується перекриттям об'єкта. Потім, не змінюючи напругу трансформатора T1 і відстань між іскровими проміжками ступенів, зближують кулі вимірювального розрядника доти, поки електрична міцність проміжку між ними не стане рівною електричній міцності ізоляції випробовуваного об'єкта. В ідеальному випадку експеримент закінчується після того, як із 100% розрядів ГІН 50% приходиться на розрядні опори, 25% викликають перекриття ізоляції об'єкта, а 25% – перекриття між кулями вимірювального розрядника.

Знаючи діаметр вимірювальних куль і відстань між ними, визначають $U_{50\%}$.

Доступ на дослідне поле можливий тільки після відключення рубильника видимого розриву S1, контактора КМ, зниження напруги на виході регулятора T2 і автоматичного розряду конденсаторів ГІН замикачами

S2, S3. Після цього можна відкрити двері на дослідне поле і накласти переносне заземлення по черзі на конденсатори ступенів ГІН.

8.4. Завдання

1. При підготовці до виконання лабораторної роботи ознайомитися з правилами техніки безпеки (досконало вивчити інструкцію №155, яка знаходиться в лабораторії), зі схемою установки та методикою проведення лабораторної роботи.

2. Вивчити принцип роботи схеми експериментальної установки і методику роботи на ній при визначенні 50%-них розрядних напруг.

3. Визначити величину $U_{50\%}$ проміжку стержень – площина для чотирьох різних відстаней (d) між електродами. Визначити пробивну напругу U_0 для досліджуваних міжелектродних проміжків і коефіцієнт імпульсу β . Дані вимірів занести в табл. 8.1.

Табл. 8.1. Результати вимірів та розрахунків

Вид проміжку	$U_{50\%}$, кВ	U_0 , кВ	d , см	β	δ
Досліджуваний проміжок					
Кульовий розрядник					

4. Визначити коефіцієнт імпульсу для ізолятора типу ШФ-20.

5. Побудувати графіки $U_{50\%} = f(d)$ для досліджуваного проміжку і вимірювальних кульових розрядників.

6. Зробити висновки по роботі.

Контрольні запитання

1. Що таке 50%-на розрядна напруга?
2. Від чого залежить час запізнювання розряду?
3. Як визначаються тимчасові параметри імпульсу?
4. Яку інформацію несе вольт-секундна характеристика проміжку?
5. Що таке коефіцієнт імпульсу β і від чого залежить його величина?
6. У чому полягає принцип роботи ГІН?
7. Як регулювати амплітуду вихідної напруги ГІН?

Лабораторна робота №9.
ДОСЛІДЖЕННЯ ЗОН ЗАХИСТУ СТЕРЖНЕВИХ
БЛИСКАВКОВІДВОДІВ

9.1. Мета роботи: вивчити інженерну методику розрахунку захисних зон стрижневих блискавковідводів та набути умінь і навичок їхнього експериментального уточнення.

9.2. Теоретичні положення

Перенапруги при прямому ударі блискавки (ПУБ) завжди перевищують рівень ізоляції електроустаткування і приводять до її пробую або поверхневого перекриття. В ізоляції утворюється провідний канал, по якому спочатку в землю стікають атмосферні заряди, тобто проходить струм блискавки, а потім протікає струм промислової частоти, підтримуваний джерелами е. р. с. енергосистеми (для енергосистем із заземленою нейтраллю – це струм короткого замикання).

Через високу вартість устаткування підстанцій і труднощі ліквідації наслідків короткого замикання правила будови електроустановок вимагають, щоб у всіх випадках були виключені прямі удари блискавки в устаткування підстанції.

Захист підстанцій від ПУБ здійснюється вертикальними стрижневими блискавковідводами. Для розрахунку захисних зон блискавковідводів розроблена інженерна методика, що базується на результатах лабораторних експериментів.

Гророва хмара і "лідер", що опускається з неї (рис. 9.1), обумовлюють нагромадження на землі і різних об'єктах зарядів протилежного знаку. На високому об'єкті ці заряди створюють високу напруженість електричного поля, майже завжди достатню для іонізації повітря і розвитку зустрічного лідера, до якого і спрямовується розряд блискавки.

На здатності блискавки вражати металеві предмети, що височать над землею, заснована захисна дія блискавковідводів.

Висота H , при якій лідер починає орієнтуватися на найбільш високий заземлений об'єкт, називається висотою орієнтування блискавки. Встановлено, що для стрижневих блискавковідводів висотою $h \leq 30$ м

$$H = (10 \dots 20)h, \quad (9.1)$$

для більш високих – $H = 600$ м.

Якщо точка орієнтування блискавки знаходиться над блискавковідводом (рис.9.2), то в нього і потрапить удар. Якщо ця точка, залишаючись на тій же висоті, зміститься на відстань R , то поки:

$$R \leq 3,5hp = R_0, \quad (9.2)$$

усі ПУБ потраплять у блискавковідвід, а при:

$$R > R_0, \quad (9.3)$$

потраплять або в блискавковідвід, або в землю поблизу його, де $p = 1$, якщо $h \leq 30$ м.

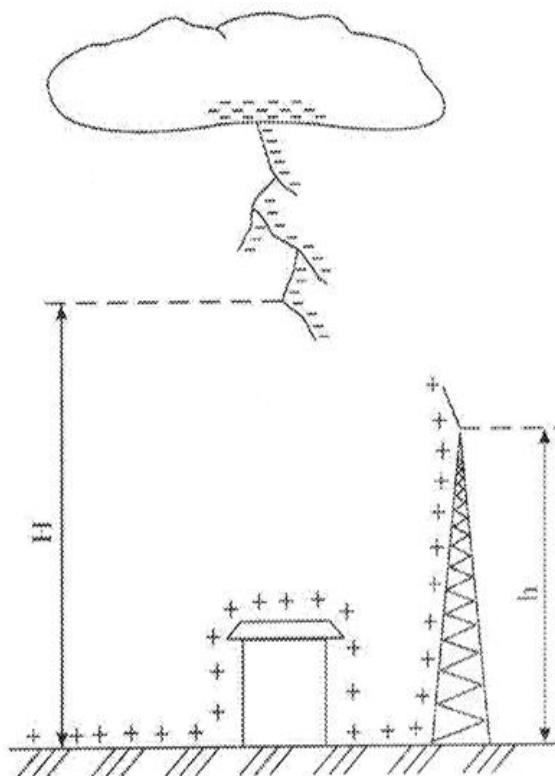


Рис. 9.1. Розвиток блискавки і зустрічного лідера

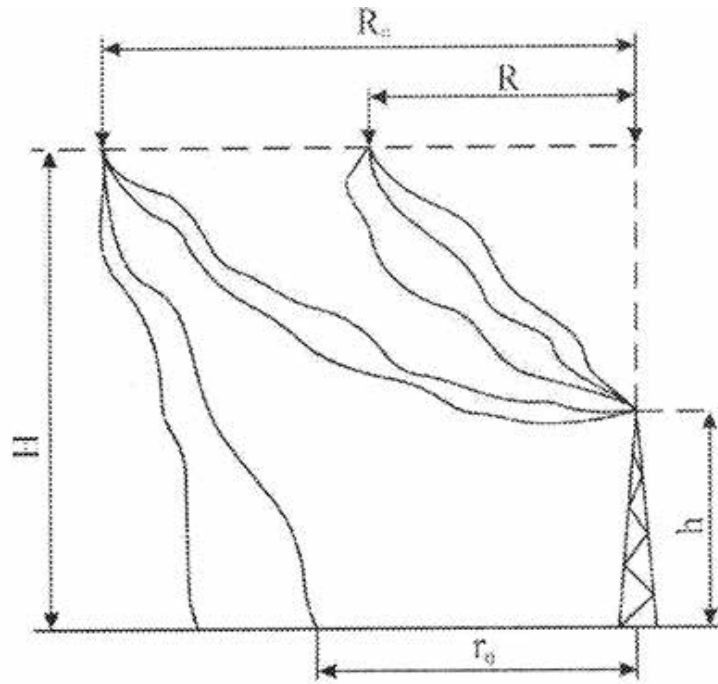


Рис. 9.2. Зона 100%-ного влучення у блискавковідвід і зона захисту

При $h > 30$ м:

$$p = \frac{5,5}{\sqrt{h}}, \quad (9.4)$$

де h – висота блискавковідводу.

При цьому на землі поблизу блискавковідводу є зона радіуса $r_0 = 1,6hp$, куди ПУБ не потрапляє.

Прийнято називати зону радіуса R_0 зоною 100%-ного влучення в блискавковідвід, а радіуса r_0 – зоною захисту на рівні землі.

Якщо об'єкт має висоту h_x , то радіус зони захисту може бути визначений за емпіричною формулою, справедливою для блискавковідводів висотою $h \leq 60$ м:

$$r_x = \frac{1,6p}{1 + \frac{h_x}{h}} (h - h_x) \quad (9.5)$$

або ламаною лінією 1 рис.9.3, а.

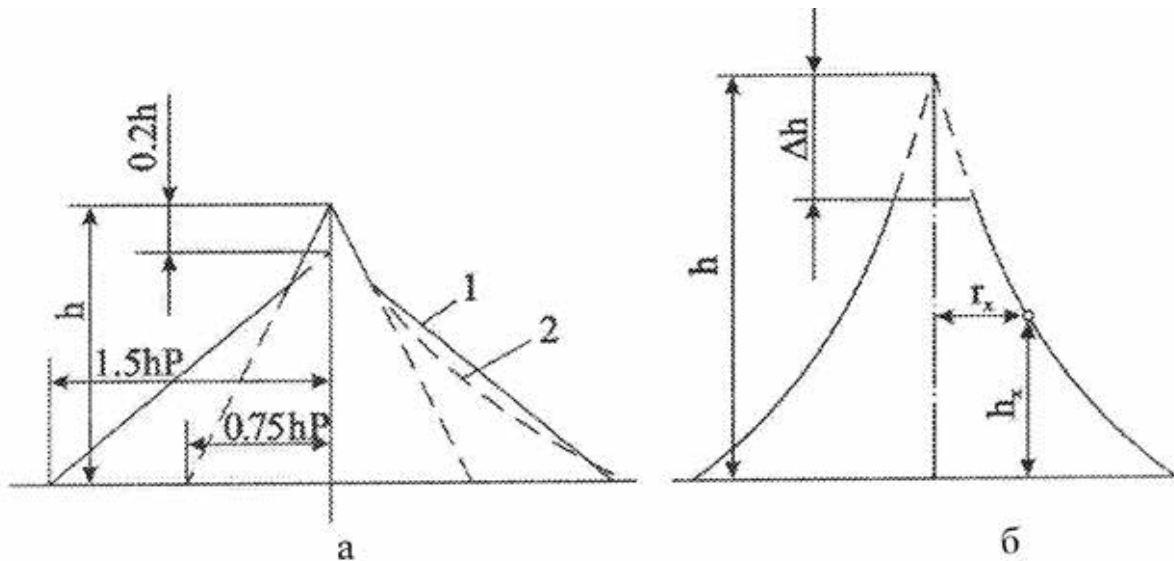


Рис. 9.3. Зона захисту стержневого блискавковідводу висотою: а – до 60 м; б – більш 60 м

При значній висоті об'єкта і блискавковідводу на їхній вершині збирається великий заряд, напруженість поля різко зростає, іонізація охоплює всю верхню частину блискавковідводу, і властивості блискавки слабшають.

Тому для блискавковідводів з $h = 60 \dots 250$ м вважають, що зона захисту, обумовлена за (9.5), усічена на відстані Δh від вершини (рис. 9.3, б) на величину:

$$\Delta h = 0,5 (h - 60) \quad \text{при } 60 < h < 100 \text{ м}; \quad (9.6)$$

$$\Delta h = 0,2 h \quad \text{при } 100 < h < 250 \text{ м}.$$

Зона захисту двох стрижневих спільно діючих блискавковідводів (подвійного блискавковідводу) більша суми зон захисту двох окремих блискавковідводів такої ж висоти. Дійсно, якщо два блискавковідводи знаходяться на відстані $a = 2R_0 = 7h$, то всі ПУБ потраплять у блискавковідводи. Якщо об'єкт, що захищається, лежить на висоті h_0 між блискавковідводами висотою h (рис. 8.4), то:

$$a < 7(h - h_0). \quad (9.7)$$

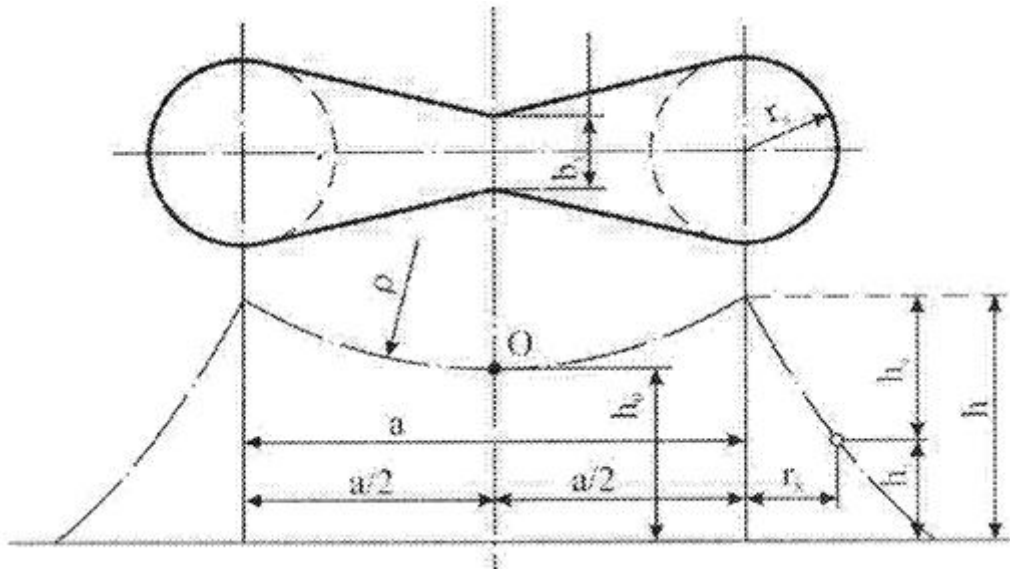


Рис. 9.4. Зона захисту двох стрижневих блискавковідводів висотою до 60 м

Найменша ширина b_x зони захисту на рівні h_x визначається за графіками (рис. 9. 5). Інші побудови внутрішньої частини зони захисту і побудова її

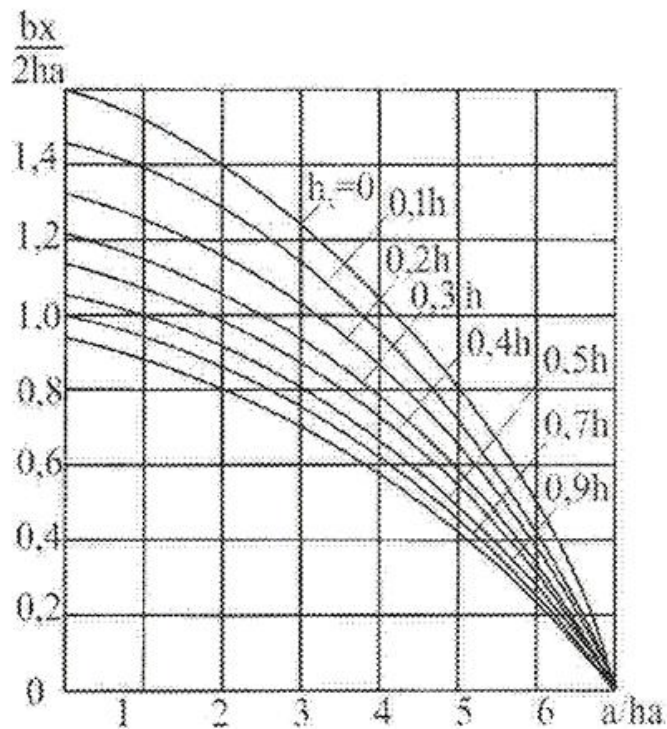
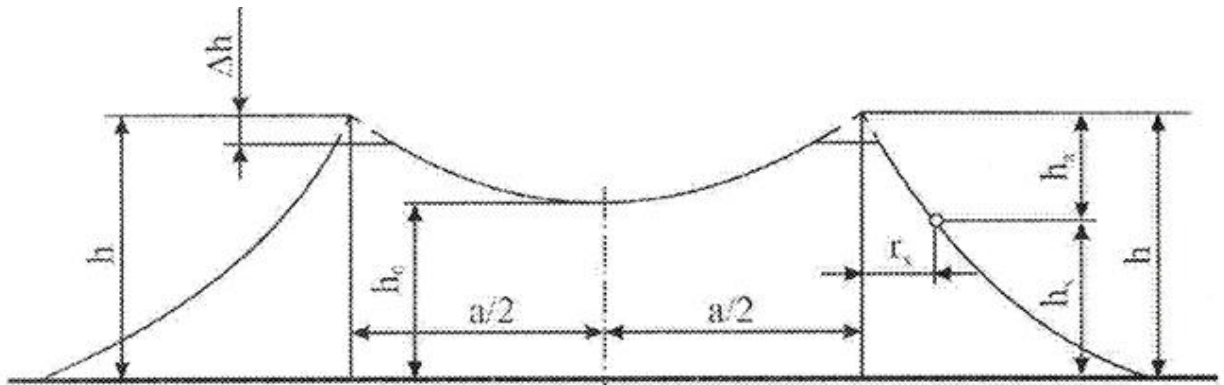


Рис. 9.5. Найменша ширина зони захисту двох блискавковідводів висотою до 30 м зовнішньої частини наведені на рис. 9.4, де ρ – радіус кола, що проходить через вершини блискавковідводів і точку, що знаходиться на рівні h_0 . Для кожного з

блискавковідводів, у яких $60 \leq h \leq 250$ м, зона захисту зверху відсікається (рис. 9.6) на величину Δh , обумовлену згідно з виразом (9.6). В усіх випадках, коли $30 < h < 250$ м, коефіцієнт p визначається за формулою (9.4).

Рис. 9. 6. Зона захисту двох стрижневих блискавковідводів висотою більш як 60 м



Зона захисту трьох блискавковідводів складається з двох частин (рис. 9.7): зовнішньої, яка лежить на поверхні землі поза трикутником, вершинами якого є місця встановлення блискавковідводів, і внутрішньої, що знаходиться в цьому трикутнику.

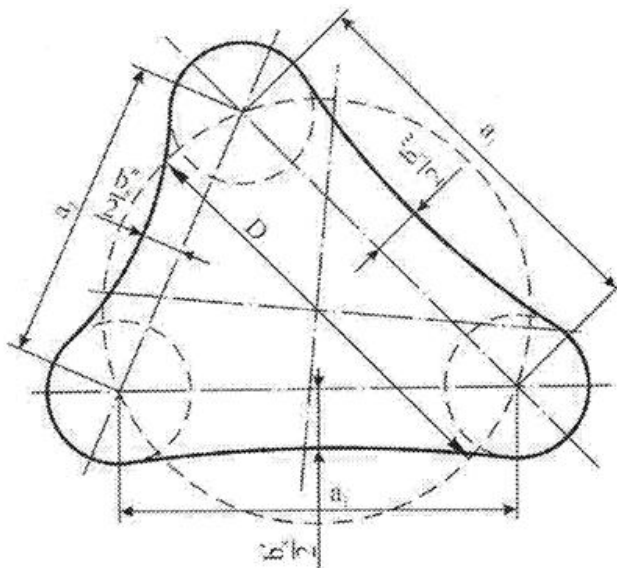


Рис. 9.7. Захисна зона трьох стрижневих блискавковідводів

Зовнішня частина зони захисту розраховується для кожної пари блискавковідводів за наведеною методикою, а для внутрішньої частини – лише визначається найвищий рівень h_0 , захищений по всій площі трикутника. Для такої перевірки через блискавковідводи проводиться допоміжне коло.

Необхідною умовою захищеності всієї площі трикутника на рівні h_0 є:

$$D < S(h - h_0)p, \quad (9.8)$$

де D – діаметр допоміжного кола;

p – коефіцієнт, який визначається згідно з (9.4).

При $h > 60$ м зовнішня частина зони захисту відсікається від вершини на відстані Δh , визначеній за формулою (9.6), а внутрішня частина зони не відсікається.

При довільному розташуванні декількох блискавковідводів їхня зона захисту розглядається як сума зон будь-яких трьох сусідніх блискавковідводів.

Вважається, що зона захисту двох блискавковідводів різної висоти складається з двох частин (рис. 9.8): зони захисту більшого блискавковідводу 1 і зони захисту двох блискавковідводів 2 і 3 однакової висоти, з яких один (3) є фіктивним. Для визначення відстані a_ϕ між блискавковідводом меншої висоти та фіктивним спочатку будується зона захисту одиночного блискавковідводу більшої висоти, а потім з вершини меншого блискавковідводу 2 проводиться горизонтальна лінія до перетинання з цією зоною в точці 3, що і приймається за вершину фіктивного блискавковідводу. Для стрижневих блискавковідводів $h < 60$ м зона захисту в їхніх вершин відсікається на відстані Δh від вершини конкретно для кожного з блискавковідводів і відповідності до формули (9.6).

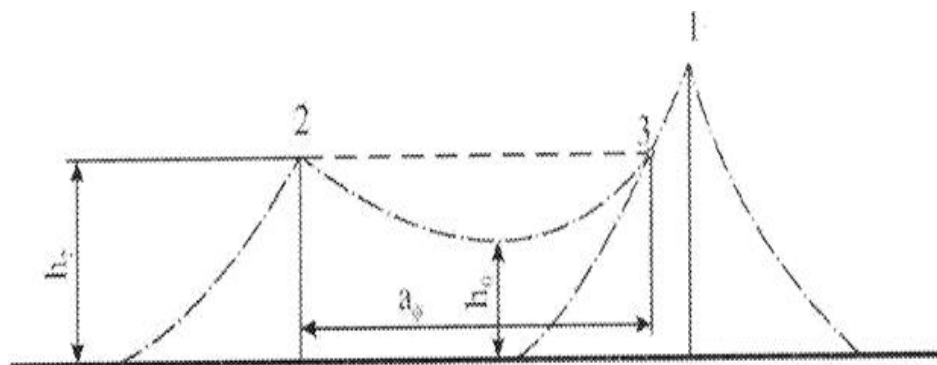


Рис. 9.8. Зона захисту двох блискавковідводів різної висоти

Надійність блискавкозахисту характеризується кількістю β проривів блискавки за 1 рік на захищений об'єкт або кількістю років, за які очікується один прорив блискавки в зону захисту:

$$M = 1/\beta, \quad (9.9)$$

де

$$\beta = \Psi N, \quad (9.10)$$

де Ψ – імовірність прориву в зону захисту;

N – сумарна кількість ударів за 1 рік у блискавковідводи, що захищають об'єкт, і в сам об'єкт.

Площа зони 100%-ного влучення в одиночний стрижневий блискавковідвід (км²):

$$S = \pi R_0 = \pi(3,5h)^2 = 38,5h \cdot 10^{-6}. \quad (9.11)$$

Кількість ударів блискавки в землю площею 1 км² за 1 год грози

$$j = 0,06 \text{ (км}^2\text{ч)}^{-1} \quad (9.12)$$

Тому при середній тривалості T (год) грозового сезону в даній місцевості очікувана кількість ударів блискавки на рік в одиночний блискавковідвід

$$N = jST = 2,3h^2 T \cdot 10^{-6}, \quad (9.13)$$

де h – висота блискавковідводу, м.

Радіус зони 100%-ного влучення у блискавковідвід можна вважати незмінним і рівним $3,5h$ як при великій кількості блискавковідводів, так і при розгляді ударів блискавки у велике спорудження (рис. 9.9). Тому кількість ударів у спорудження довжиною l (м), шириною m (м) і висотою h (м) визначається за формулою (9.13), де:

$$S = (l + 7h)(m + 7h). \quad (9.14)$$

Імовірність Ψ прориву блискавки на об'єкт особливо велика при його розташуванні в краю зони захисту. Чим глибше знаходиться об'єкт, тим ця імовірність менша.

Для відкритих розподільних пристроїв станцій і підстанцій, а також для підсобних споруджень вважаються достатніми зони захисту, визначені з імовірністю прориву $\Psi \leq 10^{-2}$. Для шинопроводів високої відповідальності і вводів апаратів використовуються зони захисту з імовірністю $\Psi \leq 10^{-3}$.

Найменша імовірність прориву блискавки на об'єкт відповідає його розміщенню в глибині внутрішньої частини зони захисту багаторазових блискавковідводів.

Зрозуміло, що в того самого блискавковідводу захисна зона, при якій імовірність прориву нижче, має менші розміри (рис. 9.10).

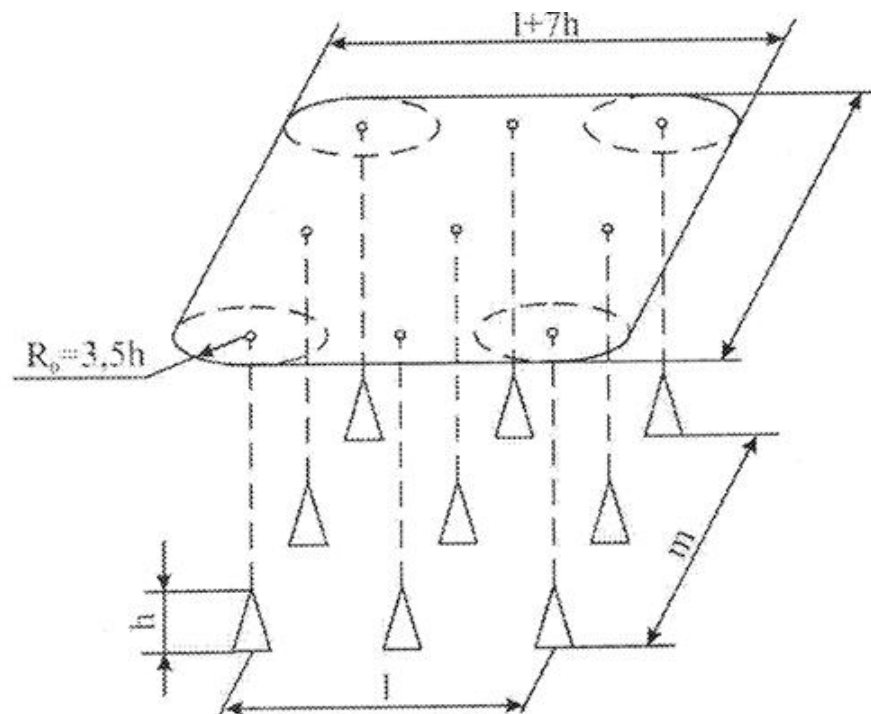


Рис. 9.9. До визначення площі, з якої блискавковідводи збирають на себе удари блискавки

9.3. Експериментальна установка і методика виконання роботи

Як джерело, що імітує розряд блискавки, у роботі використовується генератор імпульсних напруг (ГІН) на 500 кВ. Хоча більшість ПУБ у землю має негативну полярність, у лабораторних дослідженнях зон захисту від ПУБ застосовують імпульси напруги позитивної полярності, тому що при цьому відношення довжини зустрічного лідера (рис.9.1) до відстані від лідера до заземленої пластини зростає і наближається до реальних умов.

ГІН-500 (рис. 9.11) складається з чотирьох конденсаторних ступінів, кожна з яких містить зарядні опори R_0 , по два послідовно включених конденсатора, по чотири іскрові проміжки і зарядного пристрою. Зарядний пристрій – джерело випрямленої напруги – зібрано за схемою подвоєння напруги на базі високовольтного трансформатора T , двох кенотронів VD1 і VD2 і трьох захисних опорів R_3 .

У роботі ГІН можна простежити два етапи. На першому відбувається заряд конденсаторів усіх ступенів ГІН. Конденсатори ступенів при цьому паралельно підключені до вихідних клем A, B зарядного пристрою через зарядні опори. Напруга зарядного пристрою U_{AB} досягає 125 кВ при допустимій нарузі для кожного конденсатора 70 кВ.

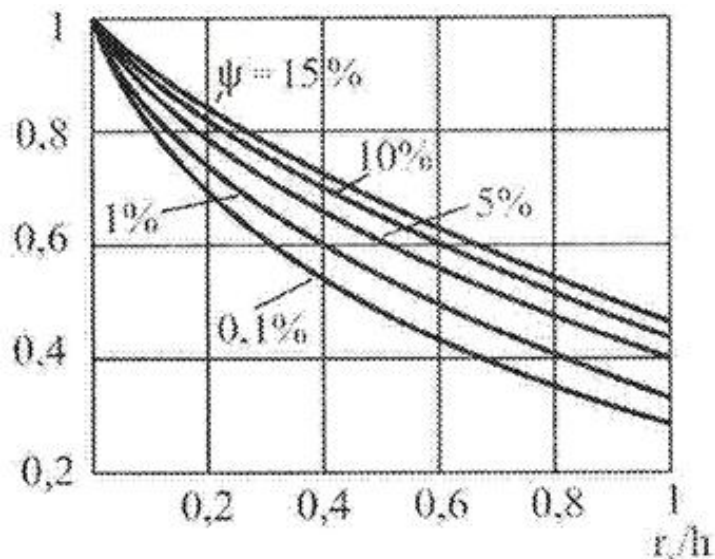


Рис. 9.10. Захисні зони стрижневого блискавководводу при різній імовірності прориву блискавки

На другому етапі внаслідок практично одночасного пробую всіх іскрових проміжків заряджені конденсатори ступенів з'єднуються послідовно, їхні зарядні напруги складуються, і на виході ГІН формується однократний імпульс напругою 500 кВ, достатній для пробую повітряного проміжку *лідер* L – земля. Додатковий опір R_d , включений в розрядний ланцюг ГІН, слугує для

обмеження розрядного струму і одночасно звукового ефекту, що виникає при спрацьовуванні ГІН.

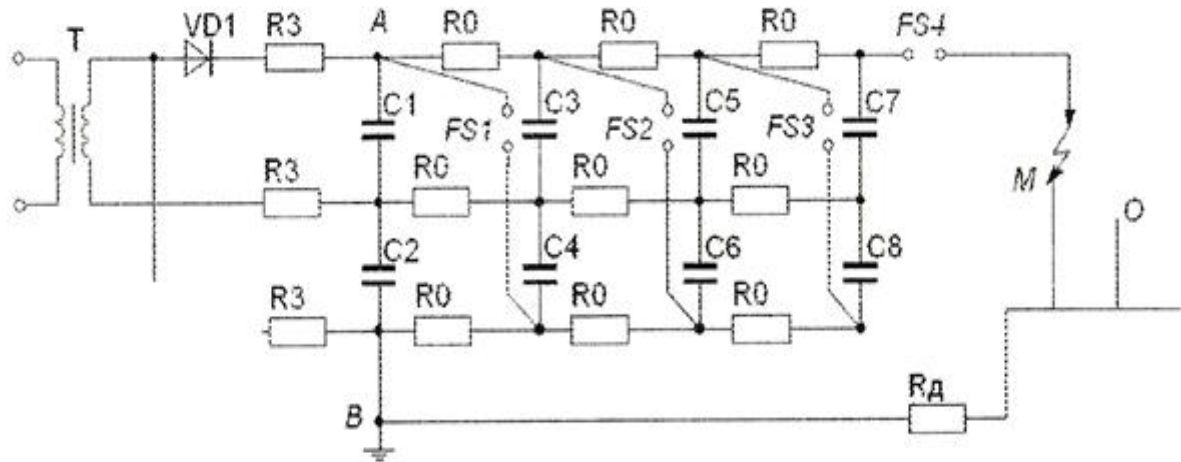


Рис. 9.11. Схема стенда для визначення захисної зони блискавковідводів

Земля моделюється металевою пластиною. На ній розміщується моделі блискавковідводів (М) і об'єктів (О), що захищаються, висота яких визначається за умовами геометричної подібності.

Визначення зони захисту одиночного блискавковідводу (рис. 9.12) починають із встановлення його під моделлю лідера. Ввімкнувши ГІН і переконавшись у безумовному ураженні блискавковідводу 2 (висотою 12 см), зміщують його з-під моделі лідера, поки з 10 розрядів хоча б один не потрапить у землю. Потім необхідно зменшити відстань між блискавковідводом і проекцією лідера на 0,5–1 см і переконатися, що розряди потрапляють тільки в блискавковідвід, тобто що отримана відстань дорівнює радіусу зони 100%-ного влучення в блискавковідвід. При такому розміщенні моделей лідера і блискавковідводу визначається захисна зона останнього. Для цього на лінії між блискавковідводом і проекцією лідера встановлюється об'єкт 3 висотою h_x на такій найбільшій відстані r_x від блискавковідводу, при якій тільки один з 10 розрядів потрапляє в нього. Взявши об'єкти з іншими h_x визначають нові значення r_x також з умови, що тільки один з 10 розрядів проривається на об'єкт.

Запропонована методика експерименту називається десятиударною і забезпечує прорив блискавки на об'єкт з імовірністю $\Psi = 10\%$.

Визначення зони захисту двох блискавковідводів здійснюють також за десятиударною методикою. Установивши точно під моделлю лідера об'єкт висотою $h_0 = 8$ см, на прямій, яка проходить через нього, розміщують симетрично два блискавковідводи висотою 12 см. Змінюючи відстань між цими блискавковідводами (рис.9.13), знаходять його найбільше значення a , при якому об'єкт захищений з імовірністю $\Psi = 10\%$. Потім об'єкт забирають з-під лідера, а блискавковідводи поступово зміщують у нове положення $M'M'$, максимально віддалене від попереднього, але при якому з 10 розрядів усі 10 ще уражають їх. Встановлюють об'єкт у нове положення O' між блискавковідводами і переконуються, що він не захищений. Зміщуючи блискавковідводи у бік об'єкта, уточнюють значення a' .

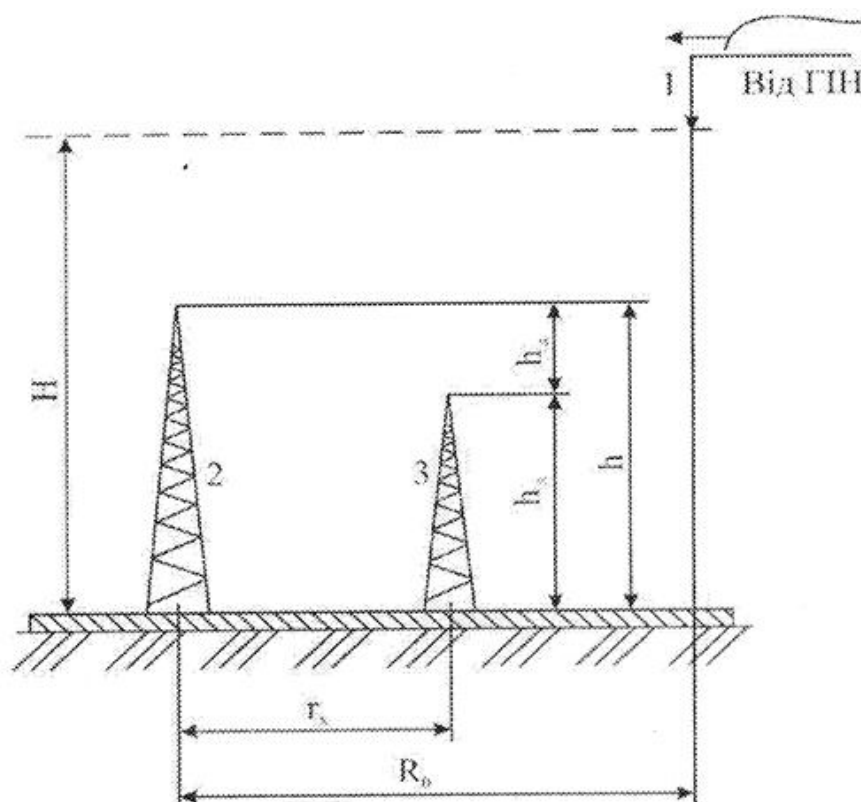


Рис. 9.12. Визначення зони захисту стрижневого блискавковідводу

Для визначення ширини b_x захисної зони об'єкт меншої висоти, чим попередній, переміщують від точки O' убік проекції лідера на площину. Профіль зовнішньої частини зони захисту збігається з профілем зони захисту одиночного блискавковідводу.

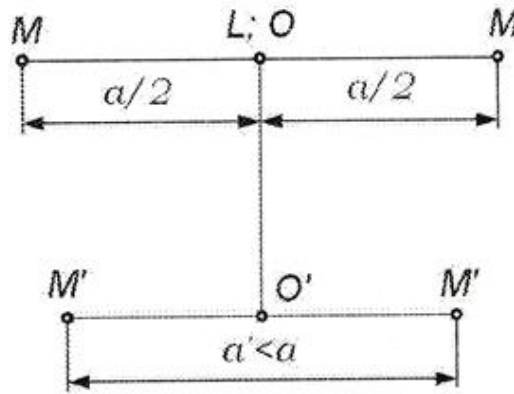


Рис. 9.13. Порядок встановлення об'єкта (O) і блискавковідводів (M) щодо проекції на площину лідера блискавки (L)

Визначення висоти внутрішньої частини зони захисту трьох блискавковідводів, розміщених за вказівкою викладача у вершинах рівностороннього трикутника, здійснюється за десятиударною методикою при встановленні об'єкта в центрі трикутника і точно під моделлю лідера.

9.4 Завдання

1. При підготовці до виконання лабораторної роботи ознайомитися з правилами техніки безпеки (досконало вивчити інструкцію №155, яка знаходиться в лабораторії), з схемою установки та методикою проведення лабораторної роботи.

2. Визначити зону захисту одиночного стрижневого блискавковідводу висотою 12 см практичним і розрахунковим шляхом. Прийняти $p=1$. Результати занести в табл. 9.1. Порівняти експериментальні дані з результатами розрахунку за формулами (9.4) і (9.5) або графічної побудови згідно з рис. 9.3, а (крива 1).

Табл.9.1. Значення параметрів зони захисту стержневого блискавковідводу

Висота об'єкта, h_x , см					
Радіус r_x зони захисту, см	розрахунковий				
	одержаний експериментально				

3. Визначити експериментальним шляхом і розрахунком формулою (8.7) і рис. 5.5 відстань між блискавковідводами і профіль поперечного перетину захисної зони двох блискавковідводів висотою 12 см з об'єктом висотою 8 см всередині між ними. Результати занести табл. 9.2. Порівняти отримані результати.

4. Визначити розрахунковим і експериментальним шляхом найменшу висоту внутрішньої частини захисної зони трьох блискавковідводів однакової висоти, розміщених за вказівкою викладача у вершинах рівностороннього трикутника.

5. Зробити висновки по роботі.

Табл.9.2. Розрахункова та експериментальна відстань між блискавковідводами і досліджуваними об'єктами

Висота об'єкта, h_x , см					
Півширина $b_x/2$, см	розрахункова				
	одержана практично				

9.5. Контрольні запитання

1. Чим обумовлена захисна дія блискавковідводів і чому спостерігаються прориви блискавки на об'єкт, що захищається?

2. З яких основних елементів складається стрижневий блискавковідвід? Які основні вимоги до конструкцій блискавковідводів?

3. Як визначаються активна висота і захисна зона стрижневих блискавковідводів?

4. Чому зі збільшенням висоти об'єкта, що захищається, і висоти блискавковідводу ефективність захисту знижується? Як враховується це явище?

5. Чому дорівнює зона 100 %-ного влучення в одиночний стрижневий блискавковідвід і тросовий блискавковідвід?
6. У чому відмінність зон захисту одиночного стрижневого блискавковідводу, що гарантують імовірність прориву блискавки на об'єкт, що захищається, 10% і 0,1%?
7. Що таке висота орієнтування блискавки?
8. Які переваги і недоліки практичного визначення захисних зон блискавковідводів на моделях?
9. Які норми і допустимі величини опорів заземлення опор лінії електропередачі, контурів заземлення станцій і підстанцій?
10. Чи припустиме приєднання заземлювачів блискавковідводів до контурів станцій і підстанцій?
11. У чому полягає методика експериментального визначення зон захисту стрижневих блискавковідводів?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Техніка високих напруг:: навч. посіб. КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В. Б. Абрамов, В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, О. Р. Проценко. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 345 с.
2. ПУЕ:2017. Правила улаштування електроустановок. Затв., наказом Міненерговугілля України від 21.07.2017 № 476. – К.: 2017.- 617 с.
3. Техніка і електрофізика високих напруг. За ред. В.О. Бржезицького, В.М. Михайлова/ Харків. НТУ “ХПІ”. – Торнадо, 2005. – 930 с.
4. Рой В. Ф. Конспект лекцій з дисципліни «Техніка високих напруг». - Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016. – 160 с.
5. Техніка високих напруг: Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів факультету електроенерготехніки та автоматики / Уклад.: В. О. Бржезицький, В. Б. Абрамов, В. М. Козюра, О. Р. Проценко, В. І. Хомініч, В. О. Шостак, І. М. Маслюченко. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 85 с.
6. Шостак В. О., Козюра В. М., Хомініч В.І., Абрамов В. Б. Техніка і електрофізика високих напруг (Частина 1). Лабораторний практикум для студентів спеціальності 7.090604, 8.090604 «Техніка і електрофізика високих напруг» (Навчальне електронне видання). – К.: НТУУ "КПІ", 2011. – 62 с.
7. Шостак В. О., Проценко О.Р. Техніка і електрофізика високих напруг (Частина 2). Лабораторний практикум для студентів спеціальності 7.090604, 8.090604 «Техніка і електрофізика високих напруг» (Навчальне електронне видання). – К.: НТУУ "КПІ", 2011. –70 с.