

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ, НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ТЕХНІКА ВИСОКИХ НАПРУГ

**Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт
для студентів факультету електроенерготехніки та автоматики**

Рекомендовано Методичною радою НТУУ «КПІ»

Київ
НТУУ «КПІ»
2011

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.

*Гриф надано Методичною радою НТУУ «КПІ»
(Протокол № 7 від 17 березня 2011 р.)*

Укладачі:

Абрамов Володимир Борисович

Бржезицький Володимир Олександрович

Козюра Володимир Миколайович

Маслюченко Ігор Миколайович

Проценко Олександр Ростиславович

Хомініч Віктор Іванович

Шостак Володимир Олександрович

Відповідальний редактор: доцент, к. т. н. Соколовський С. А.

Рецензент: доцент, к. т. н. Касьянов Г. П.

ВСТУП

Зі складових сучасного розвитку електроенергетики чільне місце посідає розробка нового, електрофізичного базису процесів в високовольтній ізоляції електроустаткування, а також його широке застосування в різних аспектах вироблення, транспортування та використання електроенергії. До ефективних досягнень цього напрямку в останні роки можна віднести: створення виробництва та впровадження в Україні кабелів зі зшитою поліетиленою ізоляцією 110 – 330 кВ, розвиток діагностики високовольтного обладнання без виводу його з експлуатації, обмеження перенапруг за допомогою високонелінійних опорів (ОПН), екологічні питання дії електромагнітних полів високовольтних систем і інші.

Відображенням суспільної необхідності вирішення подібних питань було створення навчальної спеціальності «Техніка і електрофізика високих напруг». В пропонувані «Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Техніка високих напруг»», яка викладається для спеціальностей «Електричні станції», «Електричні системи і мережі», «Системи управління виробництвом і розподілом електроенергії», «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії», «Електричні машини та апарати», внесені 7 наступних лабораторних робіт:

- Лабораторна робота № 1. Дослідження електричної міцності повітряних проміжків на змінній напрузі.
- Лабораторна робота № 2. Дослідження ефекту полярності при пробіі повітряних проміжків на постійній напрузі.
- Лабораторна робота № 3. Дослідження імпульсної електричної міцності.
- Лабораторна робота № 4. Дослідження електричної міцності вздовж поверхні твердих діелектриків.
- Лабораторна робота № 5. Дослідження розподілення напруги по гірлянді ізоляторів.
- Лабораторна робота № 6. Дослідження зон захисту стрижневих блискавковідводів.
- Лабораторна робота № 7. Дослідження імпульсних процесів в обмотках трансформаторів.

Кожна лабораторна робота є окремим цілісним експериментальним дослідженням, в результаті виконання якого, після відповідної статистичної обробки даних (Додаток 1) та оцінки їх похибки (Додаток 2), визначаються основні характеристики високовольтної ізоляції, зокрема, витримувана напруга.

Перехід від середньої пробивної (розрядної) до витримуваної (з заданою ймовірністю) напруги є концептуально новим в проведенні випробувань високовольтної ізоляції та даного циклу лабораторних робіт (порівняно з попередниками).

В частині лабораторних робіт в якості досліджуваного типу високовольтної ізоляції використовується повітря або комбіновані ізоляційні проміжки. Це пов'язано з тим, що повітря, дійсно, є важливою складовою високовольтної ізоляції. З другого боку, на повітряних ізоляційних проміжках можна моделювати основні процеси в інших ізоляційних середовищах. При цьому, таке моделювання буде найменш затратним та виграшним у часі, що прийнятно для проведення лабораторних робіт з дисципліни «Техніка високих напруг».

Важливу роль при проведенні лабораторних робіт з техніки високих напруг відіграє суворе виконання правил техніки безпеки та технічної експлуатації високовольтного електроустаткування. Загальне ознайомлення академічної групи з цими правилами проводиться перед початком відповідного циклу лабораторних робіт, що фіксується підписами студентів та викладача у журналі з техніки безпеки кафедри.

Навчальний обсяг кожної лабораторної роботи, пов'язаної з використанням високої напруги (лабораторні роботи №№ 1 – 6), складає 4 академічні години. Даний час передбачає приймання результатів попередньо виконаної лабораторної роботи, контроль підготовки студентів до виконання чергової лабораторної роботи, ознайомлення студентів з методикою та правилами техніки безпеки виконання експериментального дослідження на високовольтному стенді (з обов'язковим фіксуванням підписів студентів та викладача у відповідному журналі техніки безпеки викладача), проведення експериментальних досліджень під наглядом викладача, відповідні вмикання та вимикання установки, обробку результатів дослідження. Порушення або невиконання студентом вимог техніки безпеки при проведенні лабораторних робіт кваліфікується як грубе порушення правил внутрішнього розпорядку НТУУ «КПІ» з відповідними наслідками.

З вищезначеного переліку лабораторних робіт перші дві лабораторні роботи («Дослідження електричної міцності повітряних проміжків на змінній напрузі», «Дослідження ефекту полярності при пробі повітряних проміжків на постійній напрузі») пов'язані з основними електрофізичними питаннями розвитку електричного пробою при високій напрузі. Лабораторні роботи «Дослідження імпульсної електричної міцності», «Дослідження електричної міцності вздовж поверхні твердих діелектриків» знайомлять студентів з питаннями електричної міцності високовольтної ізоляції в специфічних умовах. «Дослідження розподілення напруги по гірлянді ізоляторів» дає наглядне представлення основного фактору роботи високовольтної ізоляції – внутрішнього розподілення прикладеної напруги. Ця ж ла-

бораторна робота пов'язана також з питаннями перенапруг, оскільки при їх дії розподілення напруги відбувається, звичайно, за ємнісними схемами заміщення. Лабораторна робота «Дослідження зон захисту стрижневих блискавковідводів» безпосередньо пов'язана з виникненням грозових перенапруг (дією блискавки) та грозозахистом. Лабораторна робота «Дослідження імпульсних процесів в обмотках трансформаторів» виконується на основі імпульсних обмірів натурної моделі високовольтної обмотки силового трансформатора класу напруги 110 кВ і також відноситься до розділу перенапруг. Таким чином, представлений цикл лабораторних робіт комплексно охоплює основні розділи дисципліни «Техніка високих напруг».

Методичною основою при підготовці студентів до лабораторних робіт з дисципліни «Техніка високих напруг» є видання з грифом МОНУ «Техніка і електрофізика високих напруг: Навч. посібник / За ред. В. О. Бржезицького та В. М. Михайлова. – Харків: НТУ «ХПІ» – Торнадо, 2005. – 930 с.», а також інші джерела, наведені в даних методичних вказівках.

Вивчення дисципліни «Техніка високих напруг» та проведення її циклу лабораторних робіт є обов'язковою частиною підготовки фахівця електроенергетика сучасного рівня, здатного вирішувати конкретні питання розробки, проектування, експлуатації та діагностики силового електроустаткування.

Лабораторна робота № 1.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ ПОВІТРЯНИХ ПРОМІЖКІВ НА ЗМІННІЙ НАПРУЗІ

Мета роботи

Експериментальне дослідження залежностей розрядних напруг у повітрі від відстаней між електродами та конфігурації електричного поля (однорідне, неоднорідне).

Теоретичні відомості

В якості ізоляції між проводами, проводами і опорами повітряних ліній електропередач, зовнішньою ізоляцією трансформаторів та електричних апаратів широко застосовуються повітряні проміжки. Знання основних закономірностей виникнення електричних розрядів у повітрі, врахування впливів різноманітних факторів на електричну міцність повітряних проміжків дозволяють визначити її значення під час проектування високовольтного обладнання і високовольтних конструкцій.

Пояснення явища електричного пробою в газах базуються на фізичних уявленнях про створення і розвиток електронних лавин у процесі іонізації атомів чи молекул газу електронами в електричному полі. Інтенсивність процесу іонізації характеризується коефіцієнтом ударної іонізації α , який визначається як число іонізацій, що здійснюється одним електроном на шляху в 1 см під дією електричного поля.

В повітрі, як і інших електронегативних газах, основним процесом, який перешкоджає розвитку ударної іонізації, є прилипання електронів до нейтральних молекул, унаслідок чого створюються негативні іони. Характеристикою цього процесу являється коефіцієнт прилипання η , який залежить від співвідношення E/p і виду газу та визначається на підставі експериментальних даних.

З урахуванням процесів втрат електронів розвиток ударної іонізації в електронегативних газах відображується з використанням ефективного коефіцієнта ударної іонізації, що визначається як

$$\alpha_{\text{эф}} = \alpha - \eta \quad (1.1)$$

Для виникнення електричного розряду в газі необхідно, щоб в міжелектродному проміжку з'явився хоча б один електрон в результаті дії природних іонізаторів. Тоді під дією прискорення сильного електричного поля зіткнення електрона з нейтральною частинкою (атомом, молекулою) призведе до її ударної іонізації, після чого в проміжку між електродами будуть знаходитись вже два вільних електрона, кожен з яких проведе нові акти іо-

нізації з виникненням, у подальшому, лавини електронів. Кількість електронів у такій лавині

$$n = n_0 \exp \left[\int_0^x \alpha_{ef}(E) dx \right] \quad (1.2)$$

де n_0 – число початкових електронів; x – шлях, що пройшла лавина під дією електричного поля.

Виникнення електронної лавини супроводжується створенням позитивних іонів та фотонів, які завдяки певним механізмам впливу на поверхню катода і нейтральні молекули газу у міжелектродному проміжку можуть викликати появу «вторинних» електронів. Такий розряд буде підтримуватись самостійно без участі зовнішніх іонізаторів, якщо позитивні іони та випромінювання від існуючої в міжелектродному проміжку лавини будуть спричиняти появу не менше одного нового електрона, який, у свою чергу, буде створювати нову лавину з неменшим числом електронів. Таким чином, у загальному вигляді (поява вторинних електронів спричинена трьома механізмами) умову самостійності розряду можна записати у вигляді

$$\gamma(\exp \alpha L - 1) \geq 1, \quad (1.3)$$

де γ – узагальнений коефіцієнт вторинної іонізації, що враховує утворення електронів, як під дією бомбардування катода позитивними іонами, так і в результаті актів фотоіонізації поверхні катода та молекул газу у міжелектродному проміжку, що викликані фотонами випромінювання лавин; L – відстань між електродами; αL – загальна кількість ефективних іонізацій, що створені першим електроном на шляху між електродами; $\exp \alpha L$ та $(\exp \alpha L - 1)$ – відповідно, кількість електронів та кількість позитивних іонів, що будуть міститись у лавині після того, як вона перетне проміжок L між електродами.

Значення напруги, за якої у міжелектродному проміжку виконується умова самостійності розряду, називається початковою напругою U_0 .

Форма і взаємне розташування електродів, які створюють електричне поле, впливають на це поле таким чином, що напруженість електричного поля може бути однаковою для кожної точки міжелектродного проміжку або в якійсь із зон цього проміжку відрізнятись від напруженості (напруженостей) інших його зон. Залежно від розподілення вказаної напруженості електричні поля прийнято розділяти на однорідні (напруженість в міжелектродному проміжку однакова) та неоднорідні (напруженість – різна).

Однорідне поле створюється електродами, що являють собою дві паралельні площини з плоскими поверхнями безкінечної площі. Кривизна однієї або обох поверхонь електродів призводить до викривлення силових ліній електричного поля, а отже до відмінностей значень напруженостей окремих зон цього поля. 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, розташованими на відстані, меншій ніж їх діаметр, буде квазіоднорідним, але якщо ці сфери віддалити на значну відстань, то поле між ними стане 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 поля є таке, що створюється парою електродів – стрижень і площина.

Під час підйому напруги, що прикладається до міжелектродного проміжку з неоднорідним електричним полем, умови забезпечення самостійності розряду досягаються значно раніше в дуже невеликій зоні з високою напруженістю такого поля, ніж в усіх інших зонах проміжку. Це призводить до появи в цій зоні одного із видів самостійного розряду – корони. Тому в різконеоднорідних полях початкова напруга відповідає напрузі виникнення корони, а для міжелектродних проміжків з однорідним (квазіоднорідним) полем досягнення початкової напруги призводить одразу до електричному пробою.

Початкові (U_o) та пробивні ($U_{проб}$) напруги (у кіловольтах максимальних) для найпростіших геометричних форм електродів можливо визначити з емпіричних виразів.

Паралельні пласкі електроди:

$$U_o = 24,5\delta L + 6,4\sqrt{\delta L}, \quad (1.4)$$

де $\delta = pT_o/p_oT$ – відносна густина повітря; p_o , T_o – відповідно тиск і температура повітря за нормальних умов ($p_o = 101300$ Па, $T_o = 293$ К); p , T – відповідно тиск і температура повітря в умовах експерименту; L – відстань між електродами, см.

Отримані за формулою (1.4) значення будуть відповідати як початковим, так і пробивним напругам, одночасно.

Сфера – сфера:

$$U_o = \frac{1}{f} 27,2\delta(1 + 0,54/\sqrt{r\delta})L, \quad (1.5)$$

де f – геометричний фактор; r – радіус сфер, см; δ і L – те саме, що для (1.4).

За умови заземлення однієї із сфер, величина f визначається із таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

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

При $L/r \leq 2$ формула (1.5) дає значення пробивної напруги проміжку, а при $L/r > 2$ – напругу початку корони.

Коаксіальні циліндри:

$$U_o = 24,5\delta \left[1 + 0,65(\delta \cdot r_o)^{-0,38} \right] r_o \ln \frac{R}{r_o}, \quad (1.6)$$

де r_o, R – відповідно радіуси внутрішнього та зовнішнього циліндрів, см; δ – те саме, що для (1.4).

Формула (1.6) дає значення пробивної напруги проміжку при $R/r_o < 2,7$ і початкової напруги – при $R/r_o > 2,7$. Аналіз виразу (1.6) вказує, що величина

U_o має екстремум при $R/r_o \sim 2,7$.

Стрижень – площа (заземлена):

$$U_{проб} = 16,9\delta L^{0,76}, \quad (1.7)$$

де δ і L – те саме, що для (1.4).

Емпірична формула (1.7) дозволяє визначити значення пробивної напруги $U_{проб}$ проміжку «стрижень – площа» для відстаней L від 2 см до 8 см.

Стосовно цього проміжку слід зазначити, що за якоїсь заданої напруги на ньому та відстані між електродами напруженість електричного поля біля стрижня буде тим більшою, чим більшою буде поверхня заземленої площини, оскільки збільшення вказаної поверхні призводить до зростання ємності проміжку і заряду на його електродах. Тому за умов однакових міжелектродних відстаней пробивні напруги для проміжків «стрижень – площа» будуть меншими, ніж для проміжків «стрижень – стрижень». Таке твердження є справедливим для випадків коли довжина заземленого стрижня l_3 і відстань L проміжків «стрижень-стрижень» відповідають умові: $l_3 \geq 3L$. У протилежність цьому, при $l_3 < 3L$ зменшення відстані L , яке буде призводити до зростання впливу оточуючих заземлений стрижень предметів, а отже до збільшення напруженості електричного поля біля незаземленого стрижня, може відчутно впливати на зменшення пробивної напруги проміжку «стрижень-стрижень» в цілому. Така пробивна напруга у порівнянні (за інших однакових умов) з пробивною напругою проміжку «стрижень – площа» може їй дорівнювати, бути трохи більшою чи меншою.

На величину пробивної напруги впливає вологість повітря. Підвищення відносної вологості повітря призводить до деякого зростання електричної міцності повітряних проміжків через зменшення коефіцієнта ударної іонізації електронами в результаті їх прилипання до молекул водяної пари, здатних утворювати з електронами від'ємно заряджені молекули.

Окремо слід зазначити, що у випадках, коли необхідно буде застосувати уточнені дані пробивних напруг (наприклад прийняття рішення про можливість застосування дослідженого повітряного проміжку для створення якоїсь діючої моделі чи зразка обладнання), тоді отримані експериментальні значення $U_{проб}$ повинні бути приведені до нормальних умов до-

вкільця: атмосферний тиск 101,3 кПа (1013 мбар або 760 мм рт. ст.), абсолютна вологість повітря - 11 г/м³, температура - 293 К (20⁰С). Вказане приведення здійснюється за формулою

$$U_{проб н} = U_{проб} / K, \quad (1.8)$$

де $U_{проб н}$ і $U_{проб}$ – відповідно пробивна напруга, приведена до нормальних умов і отримана під час експерименту; K - поправковий коефіцієнт, що визначається згідно ГОСТ 1516.2.

Експериментальна установка і методика виконання роботи

Експериментальна установка складається з двох частин, розмежованих сітчастою огорожею. На одній частині (низьковольтній – місці роботи оператора) розташований пульт керування, що дозволяє подавати, регулювати і вимірювати напругу, яка подається на повітряні проміжки між електродами різної конфігурації для визначення електричної міцності цих проміжків, а також дистанційно регулювати відстані між зазначеними електродами. На другій (високовольтній) – джерело високої напруги та конструктивні елементи, що дозволяють встановлювати і переміщувати електроди.

Принципова схема експериментальної установки наведена на рис.7.1.

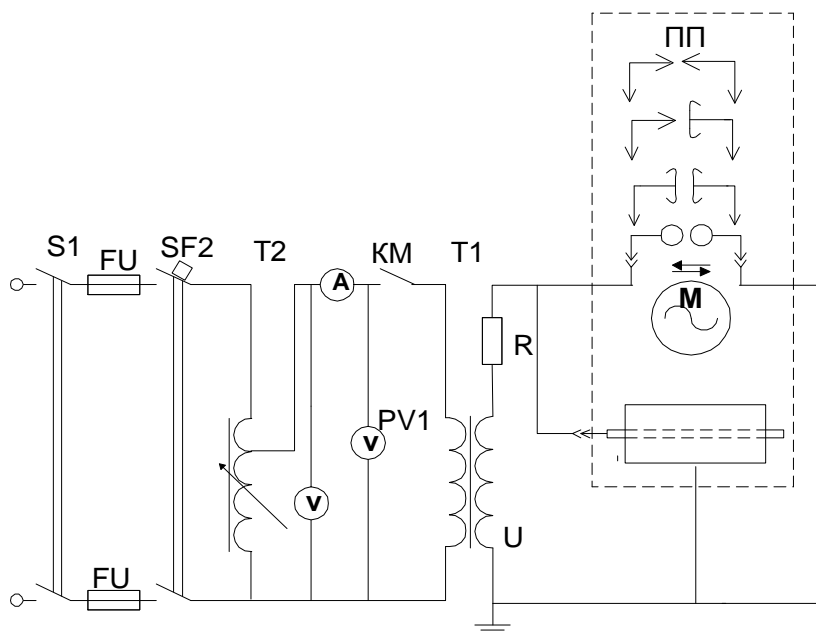


Рис. 1.1. Схема експериментальної установки

S1 –рубильник; FU – запобіжник; SF2 – автоматичний вимикач; T2 - регулятор напруги; KM - контактор; T1 – випробувальний трансформатор; R – захисний резистор; PV1 – вимірювальний вольтметр (на схемі без додаткових позначок вказані також амперметр А і вольтметр V, які є щитовими, мають низький клас точності і під час вимірювань не застосовуються); U – спеціальна обмотка для вимірювання високої напруги трансформатора T1; ПП – змінні повітряні проміжки; M – двигун регулювання відстаней між електродами ПП.

Джерелом високої напруги є випробувальний трансформатор $T1$ типу ИОМ-100/25. Випробувальний трансформатор ИОМ не має спеціальної обмотки для вимірювання високої напруги, тому вказана напруга вимірюється за показаннями вольтметра PVI з урахуванням коефіцієнта трансформації трансформатора ИОМ. Слід пам'ятати, що при вимірюваннях отримують діючі значення напруг. Для отримання амплітудних значень, які власне і відповідають пробивним напругам, що визначаються в процесі експериментів, показання вольтметра PVI слід помножити на $\sqrt{2}$.

В схемі передбачена можливість дистанційної зміни відстаней між електродами повітряних проміжків за допомогою двигуна M , що управляється ключем з пульта керування.

Плавне регулювання напруги випробувального трансформатора здійснюється регулятором $T2$.

Вмикання установки виконується за допомогою рубильника $S1$ з придатним для візуального спостереження розривом, автоматичного вимикача $SF2$ і контактора KM (контактор спрацьовує після натискання кнопки «Висока напруга» на пульта керування). В ланцюг живлення електромагніта контактора увімкнені контакти (на схемі не показані) блокування подавання напруги на випробувальний трансформатор у випадку відчинення дверей сітчастої огорожі для виконання робіт на високовольтній частині установки.

Резистор R призначений для обмеження струмових перевантажень трансформатора $T1$ у випадках виникнення електричних пробіів повітряних міжелектродних проміжків (III). В момент пробою автоматичний вимикач $SF2$ вимикає установку. Значення пробивної напруги вимірюються за допомогою вольтметра PVI .

Виконання будь-яких робіт людиною, що зайшла на високовольтну частину установки, можливе лише після повного відключення установки і накладення переносного заземлювача на високовольтний вивід трансформатора $T1$.

Електроди різної форми закріплюються на ізолювальних конструкціях і, після встановлення необхідної між ними відстані, напруга випробувального трансформатора $T1$ за допомогою регулятора напруги $T2$ підвищується до значень, за яких виникає пробій проміжку III .

Для електродів певної форми при незмінній відстані між ними дослід з електричного пробою повторюють не менше п'яти разів з вимірюванням відповідно U_1, U_2, U_3, U_4, U_5 для визначення середнього значення пробивної напруги $U_{np.сер}$. Потім дистанційно змінюється відстань між електродами і процедура визначення пробивної напруги повторюється. Дані вимірювань записуються в таблицю.

Завдання

1. Перед початком занять під час самостійної роботи з підготовки до проведення даної лабораторної роботи:

а) вивчити теоретичні положення щодо особливостей виникнення і розвитку електричних розрядів, які будуть підлягати дослідженню при проведенні даної роботи, а також з описом експериментальної установки і методикою виконання роботи;

б) використовуючи формули, наведені в теоретичних положеннях, отримати розрахункові значення $U_{\text{розр.}}$ і внести їх в табл. 1.2 і 1.3.

2. Під час проведення заняття:

а) Ознайомитись з конструктивним виконанням випробувальної установки, розташуванням її елементів, порядком проведення роботи, правилами безпечного виконання робіт на установці.

б) Дослідити електричну міцність повітряних проміжків на змінній напрузі промислової частоти для проміжків: а) площина – площина; б) сфера – сфера; в) стрижень – площина; г) стрижень – стрижень; д) коаксіальні циліндри. Зміну відстаней між встановленими електродами певної конфігурації виконувати згідно з даними, вказаними в таблиці 1.2, а для коаксіальних циліндрів відповідного радіусу внутрішнього циліндра – згідно з таблицею 1.3. Результати вимірювань $U_1 \dots U_5$ занести в таблиці 1.2 і 1.3.

в) Розрахувати для кожного досліду середнє арифметичне значення пробивної напруги $U_{\text{пр сер.}}$, визначити середнє квадратичне відхилення вимірювань σ і величину довірчого інтервалу вимірювань ϵ для кожного дослідженого проміжку, використовуючи додаток Д.1 та отримані дані занести в таблиці 1.2, 1.3 Розрахувати значення середньої пробивної напруженості електричного поля проміжку $E_{\text{пр сер.}} = U_{\text{пр сер.}}/L$, а також (згідно з Додатком 1) витримувану напругу $U_{\text{вит.}}$. Отримані дані також записати в таблиці 1.2, 1.3.

3. Для досліджених проміжків «площина – площина», «сфера – сфера», «стрижень – площина», «стрижень – стрижень» побудувати отримані на підставі експериментів та розрахунків графічні залежності пробивних напруг $U_{\text{пр сер.}}$ і пробивних напруженостей електричного поля $E_{\text{пр сер.}}$ від відстаней між електродами L , а для проміжку «коаксіальні циліндри» – від R/r_o . З метою співставлення отриманих даних, під час побудови суміщати в одній координатній сітці (на одному графіку) залежності для проміжків з різною формою електродів. Допускається експериментальні та розрахункові графічні залежності для проміжку «коаксіальні циліндри» побудувати окремо від таких залежностей для інших проміжків.

4. Проаналізувати отримані дані та залежності і зробити висновки.

Таблиця 1.2 Результати експериментів і розрахунків

Проміжок	L, см	$U_{\text{проб}}, \text{кВ}$					$U_{\text{проб сер.}}, \text{кВ}$	σ	ε	$E_{\text{проб сер.}}, \text{кВ/см}$	$U_{\text{розр.}}, \text{кВ}$	$U_{\text{вит.}}, \text{кВ}$
		U_1	U_2	U_3	U_4	U_5						
Площина-площина	1											
	1,5											
	2											
	2,5											
	3											
Сфера – сфера (радіус сфер $r = 49 \text{ мм}$)	1											
	1,5											
	2											
	2,5											
	3											
Стрижень-площина	2											
	3											
	4											
	5											
	6											
	7											
Стрижень-стрижень	2											
	3											
	4											
	5											
	6											

Таблиця 1.3 Результати експериментів і розрахунків

Проміжок	$r_o, \text{мм}$	$U_{\text{проб}}, \text{кВ}$					$U_{\text{проб сер.}}, \text{кВ}$	σ	ε	$E_{\text{проб сер.}}, \text{кВ/см}$	$U_{\text{розр.}}, \text{кВ}$	$U_{\text{вит.}}, \text{кВ}$
		U_1	U_2	U_3	U_4	U_5						
Коаксіальні циліндри (радіус зовнішнього циліндра $R = 27,5 \text{ мм}$)	0,5											
	3,0											
	4,0											
	6,0											
	7,5											
	10,0											
	15,0											
	17,5											

Контрольні запитання

1. У чому полягають особливості електричного розряду в неоднорідних полях і чим вони обумовлені?
2. Що означають поняття початкової напруги та напруги повного розряду?
3. У чому полягає фізична сутність умови самостійності розряду?
4. Чому електрична міцність електропозитивних і електронегативних газів різна? У якому випадку вона вище?
5. Чим пояснити різницю електричної міцності повітряних ізоляційних проміжків, утворених електродами різної форми?
6. Які існують механізми утворення вторинних електронів?
7. Пояснити результати (залежності), отримані в табл.1.2 на підставі розрахунків за формулами.
8. Пояснити результати (залежності), отримані в табл.1.3 на підставі розрахунків за формулами.

Лабораторна робота №2

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТУ ПОЛЯРНОСТІ ЕЛЕКТРОДІВ В ПОВІТРЯНИХ ПРОМІЖКАХ

Мета роботи

Дослідження ефекту полярності електродів в газових проміжках з різко неоднорідним полем за допомогою генератора постійної напруги GP-50/300.

Теоретичні відомості

В якості ізоляції між проводами, проводами і опорами, струмоведучими частинами електричних апаратів, найчастіше використовуються повітряні проміжки. Знання основних закономірностей виникнення електричних розрядів в повітрі, врахування впливу різних факторів на електричну міцність повітряних проміжків дозволяє визначати її значення при проектуванні високовольтних конструкцій та обладнання.

У різко неоднорідних несиметричних електричних полях (стрижень — 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. Це явище називається *ефектом полярності*. При цьому напруга виникнення корони менша при негативній полярності, а пробивна напруга – менша при позитивній полярності електрода з малим радіусом кривизни. Пояснення цього ефекту зв'язується з істотним впливом поля об'ємного позитивного заряду іонів біля катода на розподілення напруженості електричного поля в проміжку.

Розглянемо випадок коли електрод з меншим радіусом кривизни (стрижень) має *позитивну полярність*. Вважаючи, що початковий електрон з'явився в результаті природного випромінювання, поблизу вістря при позитивній полярності напруги, де $E > E_0$ ($\alpha > \eta$), виникає випадкова лавина. Як тільки в цій області кількість електронів досягає $N_{кр}$, інтенсивне випромінювання фотонів з області поблизу головки лавини буде викликати все нові лавини та поблизу вістря встановиться стабільний частковий розряд. Оптично цей розряд проявляється у вигляді слабкого блакитного світіння безпосередньо з кінця електрода, викликаного випромінюванням фотонів.

Лавини розвиваються в напрямку до вістря, тобто в напрямку до області з більш високою напруженістю поля. Число іонізацій та щільність позитивних іонів при цьому сильно зростають. Електрони внаслідок своєї високої рухливості швидко досягають анода й осаджуються на ньому, ті

іони, що залишаються в просторі, утворюють позитивний об'ємний заряд. У результаті напруженість безпосередньо поблизу вістря дещо зменшується, а в просторі між об'ємним зарядом і катодом істотно збільшується (рис. 2.1,а). Цим самим ніби коротшає ізоляційна відстань і створюються сприятливі умови для розвитку пробою.

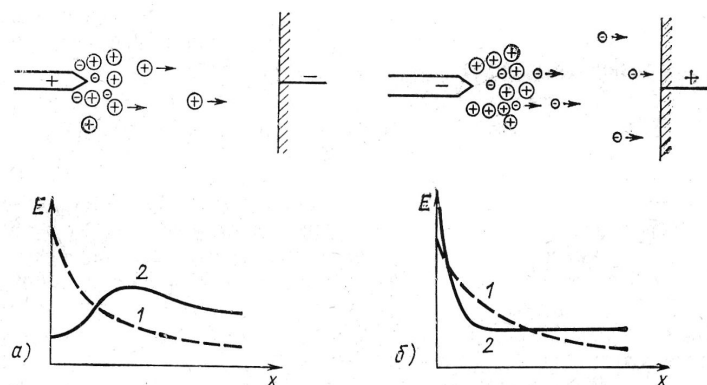


Рис. 2.1– Розподілення поля в проміжках стрижень – площина при позитивній (а) та негативній (б) полярностях напруги (1 – без врахування об'ємного заряду; 2 – з врахуванням об'ємного заряду).

У випадку *негативної полярності* стрижня початкові електрони створюються також за рахунок емісії з катода. Вони рухаються в напрямку дії поля, що слабшає. Максимум іонізації трохи віддалений від електрода, але перебуває усе ще в критичній області, де $E > E_0$ ($\alpha > \eta$). Якщо лавина при своєму розвитку в цій області здобуває критичне число електронів $N_{кр}$, то розвивається розряд під дією фотовипромінювання з її головки й відбувається розвиток розряду. Електрони швидко йдуть в область слабого поля, де $E < E_0$. Позитивний заряд у безпосередній близькості від вістря істотно підсилює поле. Біля катода напруженість поля трохи збільшується, але простір її дії істотно зменшується. (рис. 2.1,б). Тому $U+ < U-$.

З наведеного вище можна підсумувати, що при негативній полярності стрижня величина напруженості електричного поля на його поверхні збільшується за рахунок впливу позитивного об'ємного заряду іонів і зменшується в глибині проміжку. Це полегшує появу корони біля поверхні електрода, але затруднює процес проростання розряду вглиб проміжку (в область слабого поля), що приводить до збільшення розрядної напруги проміжку. При позитивній полярності спостерігається зворотня картина: поле біля поверхні електрода послаблюється, що затруднює появу корони, а в глибині проміжку підсилюється – знижуючи, таким чином, пробивну напругу.

Експериментальна установка та методика виконання роботи

Експериментальна установка побудована на основі генератора постійної високої напруги виробництва підприємства TUR (Німеччина), який генерує постійну напругу різної полярності амплітудою до 300 кВ при максимальному струмі навантаження 0,1 А.

Живлення трансформатора TR1 відбувається з мережі 380В, 50 Гц. Конструкція трансформатора виконана таким чином, що між мережевою (низьковольтною) обмоткою, та високовольтною обмоткою знаходиться ізоляція, розрахована на робочу постійну та змінну напругу 150 кВ. Функціональна схема трансформатора наведена на рис. 2.2.

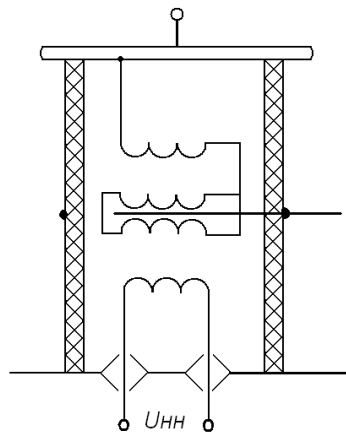


Рис. 2.2 Функціональна схема високовольтного трансформатора TR1 генератора постійної напруги GP50/300.

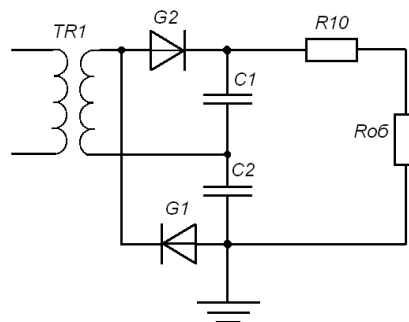


Рис. 2.3 Спрощена електрична схема генератора постійної напруги GP50/300

Змінна висока напруга максимальною амплітудою 150 кВ подається на випрямляючі селенові вентилі G1 та G2, які розраховані на зворотну напругу 300 кВ та максимальний струм навантаження до 0,1 А. При вказаних на рис.2.3 полярностях вентилів високовольтні конденсатори C_1 та C_2 (номінальна ємність 144 нФ) заряджаються до максимальної напруги в 150 кВ (один на позитивному, а інший на негативному півперіоді

промислової частоти). На виході генератора ці напруги сумуються, завдяки чому вихідна напруга генератора стає рівною 300 кВ. У разі необхідності в зміні полярності вихідної напруги потрібно змінити полярність включення вентилів G1 та G2 на протилежну.

Випробна напруга подається на об'єкт випробувань через обмежувач резистор R10, який має опір електричному струму 50 кОм, та розрахований на номінальну напругу генератора в 300 кВ. Цей опір необхідний для обмеження струму через вентиля G1 та G2 у разі пробією об'єкта випробувань, та упередження можливості пошкодження вентилів.

В генераторі передбачена можливість вимірювання вихідної напруги на об'єкті досліджень. Для цього використовується високовольтний резисторний подільник MR1/300, який має коефіцієнт ділення 1/300, та складається з високовольтного плеча R11, та низьковольтного плеча H136. Сигнал з низьковольтного плеча подається на вимірювач MU7-1, який встановлений на пульті керування генератора і має три границі вимірів – 100 кВ, 200 кВ, 400кВ, які перемикаються відповідними кнопками.

Всі елементи вимірювальної схеми мають відповідний захист розрядниками від можливості підвищення вихідних напруг вище 300 В.

Крім цього, генератор має автоматичну систему заземлення вихідних кіл, яка спрацьовує у разі відключення установки, незважаючи на причину відключення (пробій, вимкнення, спрацювання систем блокування і т.ін.).

Для проведення досліджень на лабораторному стенді необхідно детально ознайомитись з його конструкцією, елементами та їх розміщенням на випробувальному полі.

Ввімкнення генератора та проведення випробувань необхідно починати після узгодження з керівником плану робіт та проведення початкової підготовки стенду, яка включає наступні операції:

- зовнішній огляд стану генератора GP50/300;
- встановлення необхідної полярності вентилів генератора;
- візуальної перевірки цілісності шин заземлення, розташованих на підлозі;
- зняття переносного заземлювача та встановлення його на кінцевий вимикач над вхідними дверцятами випробувального поля;
- зачинення дверей випробувального поля на замок.

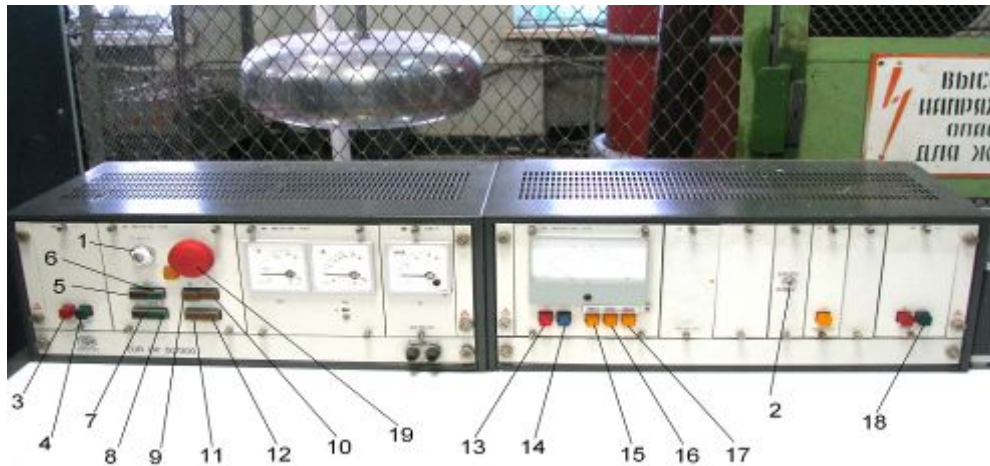


Рис. 2.4 Пульт керування лабораторним стендом

Порядок вмикання генератора постійної напруги.

1. Включити живлення генератора за допомогою вимикача[1], що замикається на ключ.
2. Включити пульт керування генератором натисканням кнопки [4].
3. Включити універсальний пристрій для вимірювання випробних напруг MU7-1 кнопкою [18].
4. Встановити, відповідно до вибраної полярності діодів, полярність режиму роботи приладу MU7-1 натиснувши відповідну кнопку [13(+)] або 14(-)].
5. Встановити граничну напругу вимірювання приладу MU7-1 на 100 кВ [17]. Якщо при проведенні експерименту вихідна напруга генератора перевищить 100 кВ, то переключити діапазон приладу на 200 кВ кнопкою [16] або, при необхідності, на 400 кВ кнопкою [15].
6. Включити головний контактор живлення генератора постійної напруги GP50/300 натисканням кнопки [6].
7. Встановити необхідну для досліджень відстань між електродами перемикаючи тумблер [2] в режими «ВВЕРХ» або «ВНИЗ».
8. Включити кнопкою [8] контактор подачі високої напруги.
9. Почати підйом високої напруги натиснувши на кнопку [11], контролюючи процес за показанням стрілкового приладу MU7-1. Зменшення напруги відбувається шляхом натискання на кнопку [12]. Швидкість підйому та зниження напруги регулюється реостатом, який знаходиться на правій тумбі пульта керування справа від оператора. Рекомендована швидкість підйому напруги – 1-5 кВ/сек.
10. У разі необхідності генератор GP50/300 може бути вимкнений в аварійному режимі шляхом натискання червоної кнопки [19]. У цьому випадку автоматично вимикається високовольтний трансформатор TR1,

заземлюються накопичуючі конденсатори C_1 та C_2 , регулятор напруги повертається в початкове нульове положення. **Режим аварійного вимкнення може супроводжуватись гучним ефектом розряду конденсаторів!**

11. Напругу піднімають до пробою ізоляційного проміжку уважно стежачи за показанням приладу MU7-1 з метою фіксування напруги пробою.

12. Після пробою іскрового проміжку установка генератора GP50/300 автоматично вимикає високовольний трансформатор TR1, заземлює накопичуючі конденсатори C_1 та C_2 та повертає регулятор напруги в початкове нульове положення.

13. У випадку коли в процесі експерименту виникла необхідність його припинити, необхідно натиснути на кнопку зменшення напруги [12] та контролювати зниження напруги за показанням приладу MU7-1.

Порядок вимикання генератора постійної напруги.

1. Необхідно зменшити напругу на виході генератора до нуля шляхом натискання кнопки [12]. Напругу контролювати за показанням приладу MU7-1.

2. Виключити кнопкою [8] контактор подачі високої напруги.

3. Виключити кнопкою [5] пульт керування генератором GP50/300.

4. Виключити пульт керування генератора натисканням кнопки [3].

5. Виключити живлення генератора за допомогою вимикача[1], що замикається на ключ.

Увага! При вході в іспитове поле лабораторного стенду УПТ-300 необхідно діяти відповідно до інструкції з правил техніки безпеки. Вхід на високовольне поле без викладача ЗАБОРОНЕНО у будь якому випадку.

Завдання

1. Встановити діоди для отримання на виході генератора GP50/300 напруги позитивної полярності (при цьому полярність стрижня буде негативною!)

2. Встановити, у відповідності до табл.2.1, відстань між електродами рівною 3 см, що відповідає нижньому видимому значенню шкали стрижньового електроду 25 см.

3. Встановити необхідну границю вимірювання приладу MU7-1.

4. Включити генератор та піднімати напругу до пробою міжелектродного проміжку. Швидкість підйому встановити в межах 1-5 кВ/сек.

5. Після пробою занести значення пробивної напруги (зфіксовану приладом МУ7-1) до протоколу лабораторної роботи в ряд.2 табл. 2.1.

6. Повторити дослід ще 4 рази. Значення внести до протоколу в ряд.3-6 табл. 2.1.

7. Аналогічно виміряти розрядні напруги для всіх міжелектродних відстаней, вказаних в табл. 2.1.

8. Попередньо вимкнувши генератор зайти на випробувальне поле генератора GP50/300 та наклавши переносний заземлювач на її середню струмовідну частину встановити діоди на негативну полярність. Знявши переносний заземлювач вийти з поля та зачинити двері.

9. Повторити дослід аналогічно до дослідів при позитивній полярності. Результати занести до таблиці 2.2.

10. Виконати статистичну обробку отриманих даних шляхом розрахунку оцінки середнього квадратичного відхилення (СКВ) та довірчого інтервалу випадкової похибки результату спостереження пробивної напруги об'єкту спостереження з ймовірністю $P=0,95$. Визначити витримувану напругу для кожного розрядного проміжку.

11. За отриманими даними побудувати на одному графіку криві $U_{np}^{(\pm)}=f(L)$, $U_{вит}^{(\pm)}=f(L)$ та $E_{np}^{(\pm)}=f(L)$, де L – відстань між електродами (стовпець 1 табл.2.1).

12. Побудувати графік $U_{np}^{(-)}/U_{np}^{(+)}=f(L)$.

13. Зробити висновок про вплив на пробивні напруги повітряних проміжків на постійній напрузі ефекту полярності.

Статистичну обробку результатів виконати у наступній послідовності

1. Визначити середнє значення пробивної напруги для кожної відстані між електродами $U_{сер}$, (кВ) за формулою

$$U_{сер} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 U_{np,i} \quad (2.1)$$

2. Визначити оцінку середнього квадратичного результату вимірювання пробивної напруги за формулою

$$\sigma(U_{сер}) = \sqrt{\frac{1}{(5-1) \cdot 5} \sum_{i=1}^5 (U_{np,i} - U_{сер})^2}. \quad (2.2)$$

3. Визначити границі довірчого інтервалу випадкової похибки результату вимірювання пробивної напруги об'єкту спостереження з ймовірністю $P=0,95$ за формулою

$$\varepsilon = \pm t \cdot \sigma(U_{сер}), \quad (2.3)$$

де t – коефіцієнт Стюдента, який для ймовірності $P=0,95$ та кількості спостережень $n=5$, дорівнює $t=2,77$.

4. Визначити нижнє значення середньої розрядної напруги об'єкту дослідження за формулою

$$U_{cp} = U_{сер} - |\epsilon| \quad (2.4)$$

5. Визначити витримувану напругу для кожного розрядного проміжку

$$U_{вит} = U_{cp}(1 - 1,3\sigma) \quad (2.5)$$

де σ - найбільше значення у відносних одиницях стандартного відхилення $\sigma = 0,03$ для зовнішньої ізоляції, яке у першому наближенні можна прийняти рівним аналогічному значенню при короткочасному впливі змінної напруги у відповідності до [10].

Контрольні запитання

1. Як проявляється ефект полярності при змінній напрузі?
2. Які умови виникнення коронного розряду?
3. Поясніть механізм електричного розряду в умовах різко неоднорідного поля при впливі постійної напруги у разі, коли вістря має негативний потенціал. Намалуйте графік розподілу напруженості поля у цьому випадку.
4. Поясніть механізм електричного розряду в умовах різко неоднорідного поля при впливі постійної напруги у разі, коли вістря має позитивний потенціал. Намалуйте графік розподілу напруженості поля у цьому випадку.
5. Дайте обґрунтування рівня електричної міцності повітряного проміжку у разі впливу змінної напруги та різко неоднорідного поля.
6. Дайте пояснення впливу об'ємних зарядів на міцність повітряних проміжків у різко неоднорідному полі.
7. Намалуйте схему випробувальної установки та дайте пояснення щодо призначення кожного її елемента та їх взаємодії у процесі роботи.
8. За рахунок чого в схемі Латура подвоюється напруга?
9. Чи буде проявлятися ефект полярності між електродами площина–площина при прикладеній постійній напрузі?

Табл. 2.1 Результати експерименту та підрахунків для випадку негативної полярності стрижня в системі електродів стрижень-площина.

Розрядний проміжок, см	Значення шкали	Пробивна напруга, кВ					$U_{сер},$ кВ	$\sigma(U_{сер})$	ϵ	$U_{сер},$ кВ	$U_{вит},$ кВ	$E_{сер},$ кВ/см		
		Номер досліджу												
		1	2	3	4	5								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
3	25													
5	23													
7	21													
9	19													
11	17													
13	15													
15	13													

Табл. 2.2 Результати експерименту та підрахунків для випадку позитивної полярності стрижня в системі електродів стрижень-площина.

Розрядний проміжок, см	Значення шкали	Пробивна напруга, кВ					$U_{сер},$ кВ	$\sigma(U_{сер})$	ϵ	$U_{сер},$ кВ	$U_{вит},$ кВ	$E_{сер},$ кВ/см		
		Номер досліджу												
		1	2	3	4	5								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
3	25													
5	23													
7	21													
9	19													
11	17													
13	15													
15	13													

Лабораторна робота № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ ПОВІТРЯНИХ ПРОМІЖКІВ

Мета роботи

Дослідження імпульсної електричної міцності повітряних проміжків при різних відстанях між електродами в однорідних і неоднорідних електричних полях; ознайомлення з методом визначення 50%-ної розрядної напруги за допомогою кульових (сферичних) вимірювальних розрядників.

Теоретичні відомості

Процеси в міжелектродному проміжку при впливі імпульсних напруг, а отже, його імпульсна електрична міцність, суттєво залежать від розподілення електричного поля в проміжку, крутизни та форми напруги, що впливає, властивостей ізоляційного середовища та множини інших факторів. Тому імпульсна електрична міцність ізоляційних проміжків визначається на підставі експериментальних досліджень.

Імпульсний електричний пробій (розряд) газових проміжків розвивається за тим же механізмом, що і електричний пробій під дією постійної напруги або напруги, що змінюється повільно.

Але амплітуда напруги при імпульсному електричному пробіі іскрового проміжку може часто суттєво перевищувати постійну пробивну напругу того ж проміжку. Це пояснюється тим, що тривалість хвилі імпульсної напруги може виявитися близькою до часу, необхідного для формування повного перекриття іскрового проміжку. В цьому випадку для забезпечення формування каналу електричного розряду за час тривалості імпульсу вимагається прискорити процеси відповідальні за формування розряду. Це можливо реалізувати завдяки збільшенню амплітуди прикладеної імпульсної напруги, що приводить в свою чергу до збільшення напруженості електричного поля в міжелектродному проміжку і інтенсифікації формування розряду.

В лабораторних умовах ізоляційні проміжки випробовують повними та зрізаними імпульсами напруги. Основними часовими параметрами імпульсу є: для повного – тривалість фронту (τ_{ϕ}), повна тривалість імпульсу (τ_i); для зрізаного імпульсу – передрозрядний час (τ_3). Наприклад, для стандартних грозових імпульсів (ГОСТ 1516.2), що застосовуються для випробування ізоляції електрообладнання, часові параметри складають $\tau_{\phi} = 1,2 \pm 0,36$ мкс; $\tau_i = 50 \pm 10$ мкс; $\tau_3 = 2 \dots 5$ мкс і визначаються за рис.3.1.

Розглянемо розвиток розряду в часі на прикладі його формування в повітряному проміжку при дії аперіодичного імпульсу напруги. Будемо вважати, що напруга достатня для формування розряду. Між моментом появи напруги (початком імпульсу) та моментом його зрізу має місце деякий час T_p , що називається передрозрядним. Він складається з трьох доданків (рис.3.2):

- часу t_0 , протягом якого напруга підвищується від нуля до значення U_0 , при якій виконується умова самостійності розряду;
- часу t_c протягом якого зовнішні іонізатори сприяють появі вільного електрону, що утворює первинну лавину електронів (так званий час статистичного запізнення);
- часу формування розряду t_ϕ .

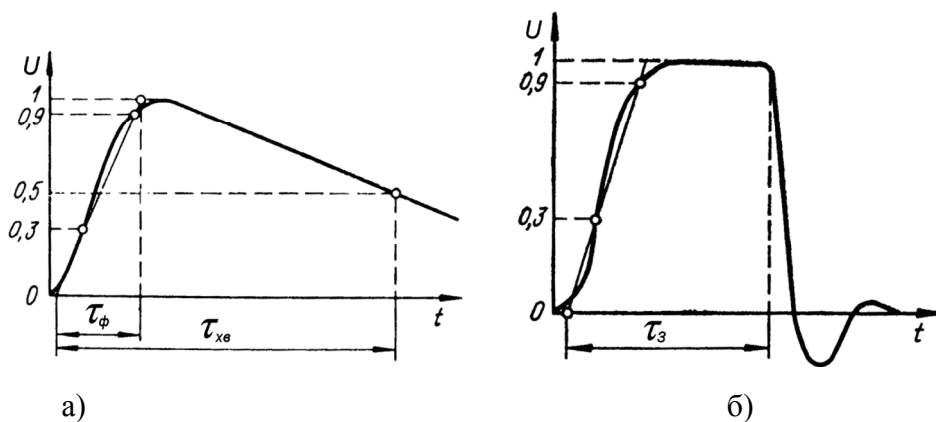


Рис.3.1. Визначення часових параметрів повного (а) і зрізаного (б) імпульсів напруги за ГОСТ 1516.2-97

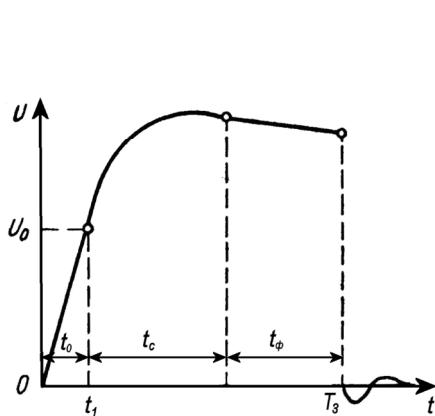


Рис.3.2. Складові передрозрядного часу

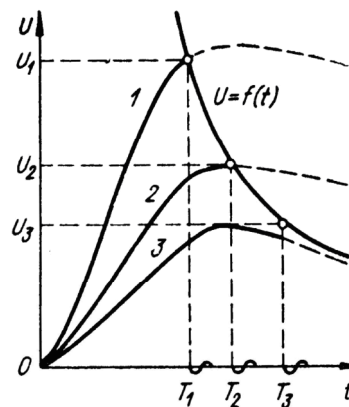


Рис.3.3. Методика побудови вольт-секундної характеристики

Час t_0 залежить від швидкості наростання напруги і від значення U_0 . Цей час буде тим більшим, чим менша швидкість наростання імпульсної хвилі і більше значення U_0 . В свою чергу значення U_0 залежить від дов-

жини розрядного проміжку, степені неоднорідності електричного поля в ньому, а також від тиску і температури повітря.

Якщо значення імпульсної напруги досягло рівня U_0 , то це не значить, що в момент часу t_0 розряд почне формуватись. Для цього потрібно дочекатись (час t_c) щоб в проміжку появився хоч би один вільний ефективний електрон. Його або їх появі може сприяти бомбардування катоду позитивними іонами, які завжди є в повітрі, або розпад від'ємних іонів, або дія зовнішнього іонізатора. Доля вільних електронів, що появляються в проміжку може бути різноманітною:

- деякі електрони, що отримали достатню енергію в електричному полі дадуть початок формування лавин електронів;
- інша частина вільних електронів може бути захвачено атомами кисню і створити електровід'ємні іони, що нейтралізуються на аноді;
- певна частина електронів вийде за межі сильного електричного поля не створивши ні одного акта іонізації.

Вірогідність того, що вільний електрон стане ефективним, залежить від напруженості електричного поля в проміжку, а отже від величини напруженості електричного поля в ньому. Всі ці процеси мають, випадковий характер, тому час очікування перших ефективних електронів є випадковою величиною.

Формування розряду відбувається в декілька етапів: формування лавин електронів, утворення стримерів та протікання інших електрофізичних процесів. Зона розповсюдження стримерів змінюється в залежності від величини напруги і степені неоднорідності електричного поля. Суттєвий вплив на формування розряду має:

- амплітуда і форма імпульсу;
- випадкове розміщення в проміжку вторинних лавин і зарядів в лавинах;
- випадковий характер траєкторій розряду, тощо.

Складові t_c та t_ϕ , а отже, час T_z є величинами статистичними: навіть при незмінних умовах (температура, тиск, вологість повітря) і однакових імпульсах передрозрядний час змінюється від досліду до досліду.

Збільшення напруги призводить до зростання напруженості поля в міжелектродному проміжку, у зв'язки з чим процеси іонізації та формування розряду відбуваються швидше, час T_z зменшується і розряди можуть відбуватися на фронті імпульсу (рис.3.3, крива 1).

При зменшенні амплітуди імпульсів напруги розряди відбуваються поблизу амплітуди (рис.3.3, крива 2), а після цього і на спаді імпульсу (рис.3.3, крива 3). Слід мати на увазі, що в останньому випадку перед зрізом напруги водночас відбуваються два процеси: формування розряду в міжелектродному проміжку та плавне зниження напруги (на спаді імпульсу). Формування розряду починається при напрузі, близькій до максималь-

ної, тому відповідна точка вольт-секундної характеристики визначається амплітудою імпульсу, а не миттєвим значенням напруги зрізу.

Імпульсна електрична міцність ізоляційного проміжку характеризується також вольт-секундною характеристикою (ВСХ), яка встановлює зв'язок між максимальною величиною напруги імпульсу, що діяла на проміжок, і часом розряду (рис.3.4).

Дослідження супроводжується осцилографуванням напруги, що діє на ізоляційний проміжок. Серія з n осцилограм дає систему двох статистичних величин (рис.3.4)

$$(U_1; T_1), \dots, (U_i; T_i), \dots, (U_n; T_n).$$

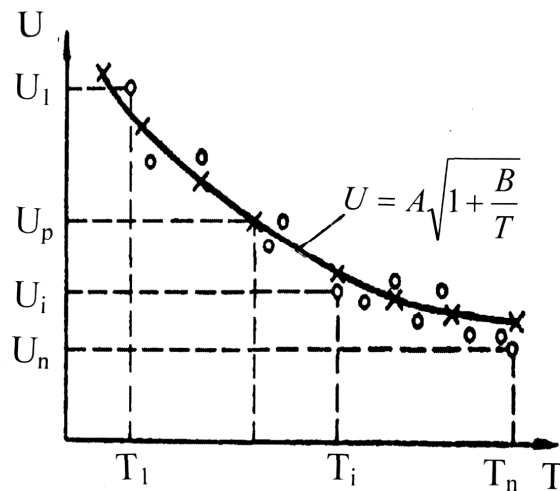


Рис.3.4. Експериментальні точки вольт-секундної характеристики і розрахункова залежність $U = f(T)$

Практичний інтерес має задача опису вольт-секундної характеристики у вигляді аналітичного виразу $U(T)$ на базі отриманих експериментальних даних. Відомі різні формули опису вольт-секундних характеристик, але найчастіше використовується формула Горєва-Машкілейсона:

$$U = A \sqrt{1 + \frac{B}{T}}, \quad (3.1)$$

де U – середня розрядна напруга; T – передрозрядний час; A, B – постійні, що залежать від експериментально отриманої при дослідженні конкретного об'єкту системи статистичних величин U_i, T_i та результатів їх обробки (рис.4).

Вимірювання амплітуд пробивної статичної напруги U_0 (вимірювання проводиться в лабораторній роботі №2) та імпульсної напруги $U_{50\%}$ дозволяє визначити так званий коефіцієнт імпульсу ізоляційного проміжку, що характеризує імпульсну міцність:

$$\beta = \frac{U_{50\%}}{U_0} \quad (3.2)$$

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

Напруга $U_{50\%}$ – найважливіша характеристика розрядного проміжку, вона визначає середнє значення його імпульсної пробивної напруги при дії на нього імпульсу заданої форми.

Експериментально величина $U_{50\%}$ у даній роботі визначається при впливі на проміжок імпульсів, що подаються з генератора імпульсних напруг 500 кВ (ГІН-500) у відповідності з рекомендаціями ГОСТ 17512-82.

Амплітуда імпульсів ГІН регулюється таким чином, щоб половина їхньої вибірки призводила до іскрового розряду в досліджуваному проміжку. Для вимірювання $U_{50\%}$ застосовується спеціальний кульовий розрядник (КР) з діаметром куль 25 см (рис.3.5).

З метою отримання достатньої точності вимірювання (похибка в межах $\pm 3\%$), однією з умов для використання КР є вимога щоб максимально допустиме відношення відстані між кулями S до їх діаметру D при вимірюваннях не перевищувало

$$\frac{S}{D} \leq 0,50, \quad (3.3)$$

причому поверхня куль повинна бути полірованою, чистою від пилу і сухою.

У цьому випадку близьке до однорідного електричне поле в КР, забезпечує практичну незалежність амплітуди пробивної напруги розрядників від тривалості напруги, що діє, у широкому діапазоні зміни її часу. Тобто КР можна застосовувати для вимірювань і постійних, і змінних, і імпульсних напруг.

Важливим фактором впливу на точність результатів вимірювання є відстань КР від сторонніх предметів, що знаходяться під напругою

або заземлених. Відстань від куль до заземлених деталей конструкцій при $S < 0,5D$ приймається рівною $10S$. Відстань до конструкцій, що знаходяться під напругою, повинна бути на 50% більша, чим відстань – до заземлених.

Величина пробивної напруги між кулями підчиняється статистичним закономірностям, тому при декількох вимірюваннях однієї і тієї напруги має місце розкид отриманих результатів. Тому вимірювання слід проводити не менше 5 раз і за виміряну величину приймати середнє арифметичне значення всіх відліків.

Вимірювана напруга визначається по відстані між кулями КР і використання відповідних таблиць Додатка 2 з врахуванням атмосферних умов.

Розрядна напруга між кулями в таблицях Додатка 2 приведена для нормальних атмосферних умов – атмосферний тиск $P_0 = 101300$ Па (760

мм рт. ст.), температура повітря $T_0 = 293 \text{ K}$ ($20 \text{ }^\circ\text{C}$). Якщо при вимірюваннях напруги атмосферні умови відрізняються від нормальних, то значення напруги взяті з таблиць Додатка 2 повинні бути помножені на поправочний коефіцієнт K_n який залежить від відносної щільності повітря ρ (Таблиця 3.1.).

Таблиця 3.1.

Відносна щільність повітря ρ	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,0	1,05	1,10	1,15
Поправочний коефіцієнт K_n	0,72	0,77	0,82	0,86	0,91	0,95	1,0	1,05	1,09	1,13

Відносна щільність повітря

$$\rho = \frac{P}{101300} \cdot \frac{273 + 20}{273 + t} = 0,00289 \frac{P}{273 + t}, \quad (3.4)$$

де: P – атмосферний тиск в, Па; t – температура навколишнього повітря, $^\circ\text{C}$.

Якщо тиск виражено в міліметрах ртутного стовпа

$$\rho = \frac{P}{760} \cdot \frac{273 + 20}{273 + t} = 0,386 \frac{P}{273 + t} \quad (3.5)$$

Експериментальна установка і методика виконання роботи

Дослідження імпульсних розрядних напруг іскрових проміжків виконується з застосування генератора імпульсних напруг на 500 кВ (ГІН-500). ГІН-500 (рис.5) складається з чотирьох конденсаторних каскадів, кожний з яких містить по два послідовно включених конденсатора, зарядних резисторів R_0 , чотирьох іскрових проміжків $P1 \dots P4$ і зарядного пристрою.

Зарядний пристрій – джерело випрямленої напруги – зібрано за схемою подвоєння напруги на базі високовольтного трансформатора $T1$, двох кенотронів $VD1$ і $VD2$ і трьох захисних резисторів R_3 .

У роботі ГІН можна простежити два етапи. На першому відбувається заряд конденсаторів усіх каскадів ГІН. Конденсатори каскадів при цьому підключені до зарядного пристрою паралельно через зарядні резистори.

На другому етапі внаслідок практично одночасного пробую всіх іскрових проміжків заряджені конденсатори каскадів з'єднуються послідовно, їхні зарядні напруги підсумовуються, і на виході ГІН формується одноразовий імпульс напругою

$$U = \eta n U, \quad (3.6)$$

де U – напруга заряду конденсаторів каскаду; n – кількість каскадів; $\eta \approx 0,7$ – коефіцієнт використання ГІН.

Порядок включення в роботу ГІН-500 (розглядаємо використовуючи рис.3.6) наступний:

- переносний заземлювач зняти з установки і перемістити його на ричаг блокування, розміщений над входними дверима стенда;
- включити автомат захисту 2;
- включити рубильник видимого розриву контактів 1;
- за допомогою кнопки управління автоматичними заземлювачами 3 розблокувати установку і зняти автоматичне заземлення безпеки;
- включити накал кенотронів кнопкою 4 (Обов'язково потрібно прогрівати кенотрони перед включенням високої напруги не менше 2 хвилин !);
- скориставшись кнопкою 5 подати напругу від автотрансформатора T_2 на високовольтний трансформатор T_1 зарядного пристрою ГІН-500. (Слід пам'ятати, що максимально допустима напруга на первинній обмотці трансформатора T_1 складає 120 В).

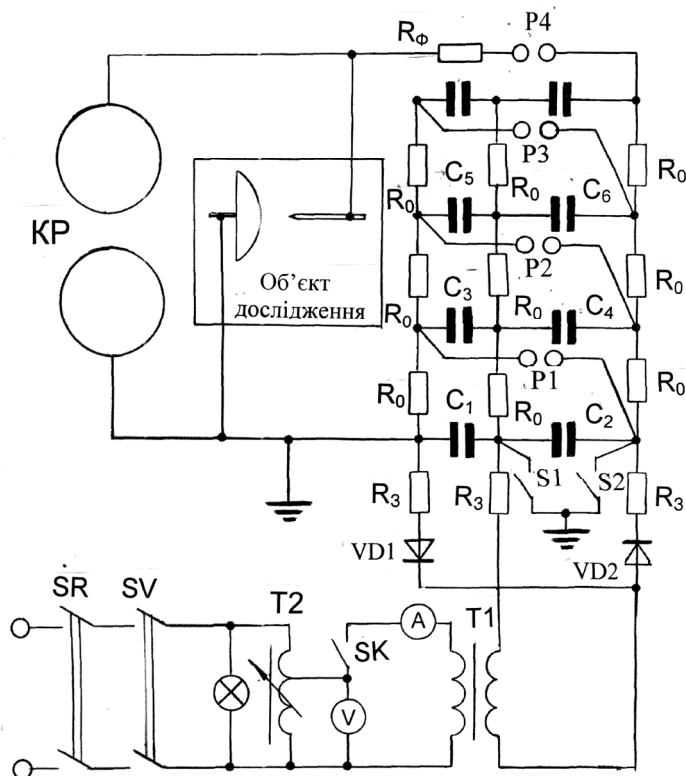


Рис.3.5. Схема експериментальної установки ГІН-500

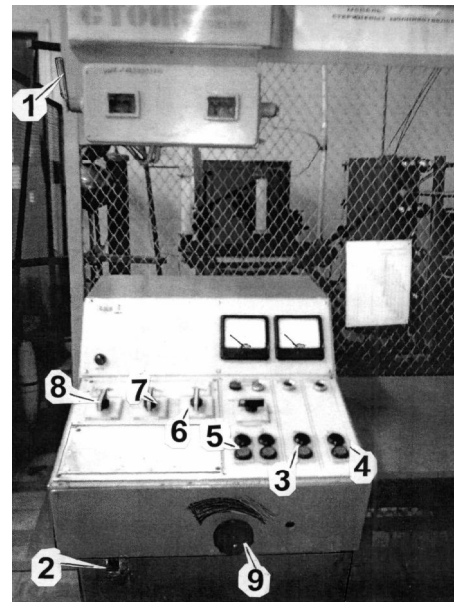


Рис.3.6. Елементи управління ГІН-500: 1–рубильник видимого розриву; 2–включення автомата захисту; 3–кнопки управління заземлювачами S1 і S2; 4–кнопки включення накалу кенотронів; 5–кнопки «ВКЛ», «ВЫКЛ» напруги на T_1 ; 6, 7, 8 – регулятори величини проміжків P1 ... P4, об'єкта дослідження, кульового розрядника КР відповідно; 9–регулювання напруги автотрансформатора T_2

Напруга імпульсної хвилі ГІН регулюється з пульту управління.

Наприклад, для збільшення, напруги необхідно збільшити відстань між іскровими проміжками Р1...Р4, після чого допустима частота імпульсів (наприклад 1 імпульс за 2 секунди) досягається регулюванням зарядної напруги каскадів ГІН за допомогою регулятора напруги 9 автотрансформатора Т₂.

Вимірювання амплітуди імпульсу, що призводить до пробою випробовуваного об'єкту, виконується в наступному порядку. На вимірювальному кульовому розряднику КР встановлюють відстань S (регулятором 8 величини проміжку КР) , при якій всі розряди ГІН супроводжуються або пробоем об'єкту, що випробовується, або розрядом конденсаторів ГІН без пробою цього об'єкту. Змінюючи відстань регулятором 6 одночасно між всіма іскровими проміжками Р1–Р4 і встановлюючи за допомогою регулятора напруги трансформатора Т2 частоту появи імпульсів (не частіше одного імпульсу за 2 с), домагаються такої напруги ГІН, при якій 50% випадків роботи ГІН завершуються пробоем об'єкту дослідження. Потім, не змінюючи напруги трансформатора Т1 та відстаней іскрових проміжків каскадів, наближають кулі вимірювального розрядника доти, доки ймовірність розряду на проміжку кульового вимірювального розрядника стане рівною ймовірності пробою випробовувального об'єкту. Після цього, знаючи діаметр вимірювальних куль та відстань між ними, за таблицями (Додаток 2) визначають $U_{50\%}$.

Доступ на випробувальне поле можливий (рис.3.6) лише після відключення рубильника видимого розриву 1 , автомата захисту 2, зниження напруги на виході автотрансформатора Т2 регулятором 9 до нульової відмітки та зняття остаткового заряду конденсаторів ГІН заземлювачами S1, S2 (необхідно натиснути кнопку 3 управління заземлювачами). Після чого можна відкрити двері на випробувальне поле (при відкритті дверей розмикається контакт блокування, що унеможливорює подачу напруги на стенд), накласти переносний заземлювач по черзі на розрядники каскадів починаючи з нижнього та залишити його на вивідному контакті ГІН.

Завдання на дослідження

1. Ознайомтесь з вимогами охорони праці по безпечній роботі на ГІН–500, описом влаштування установки і порядком проведення переключень і вимірювань на цьому дослідному стенді.

2. Вивчіть схему експериментальної установки і особливостей роботи на ній при визначенні 50 % - них розрядних напруг іскрових проміжків.

3. Визначте величину $U_{50\%}$ проміжку стержень-площина для чотирьох відстаней L між електродами , наприклад, $L_1= 8$; $L_2=11$; $L_3=14$; $L_4=17$

см при позитивній і негативній полярності імпульсної напруги. Дані вимірювань занесіть в табл.1.

4. Виконайте статистичну обробку результатів дослідження (Додаток 1).

5. Побудуйте графіки $U_{50\%} = f(L)$ і $U_{50\%} = f(S)$ за результатами дослідження проміжків стержень-площина і куля-куля.

6. Визначте для досліджуваних проміжків коефіцієнт імпульсу β . (При визначенні коефіцієнту імпульсу слід скористатись результатами лабораторної роботи №1).

Таблиця 3.2

Полярність	Проміжок L , см	Вид проміжку	Величини характеризуючі експеримент	Результати послідовності вимірювань $U_{50\%}$, кВ					$U_{50\%}$ середнє, кВ	Середнє квадрат. відхилення σ , кВ	Довірчі границі інтервалу ϵ , кВ	Коефіцієнт імпульсу β	Витримувана напруга, кВ
				1	2	3	4	5					
	9	Об'єкт дослідження	U, кВ										
		Кульовий розрядник	U, кВ										
			S, см										
	12	Об'єкт дослідження	U, кВ										
		Кульовий розрядник	U, кВ										
			S, см										
	15	Об'єкт дослідження	U, кВ										
		Кульовий розрядник	U, кВ										
			S, см										

Контрольні запитання

1. Назвіть основні складові часу розряду.
2. Як залежить час t_1 від відстані між електродами і степені неоднорідності електричного поля в проміжку?
3. Що таке час статистичного запізнювання розряду t_c ? Від яких факторів залежить цей час.

4. Яку інформацію дає вольт-секундна характеристика проміжку?
5. Що таке 50%-а напруга?
6. Як впливає полярність імпульсу на значення розрядної напруги проміжку стержень-площина?
7. Як визначити часові параметри імпульсу?
8. Які існують необхідні вимоги для забезпечення точності вимірювання кульовими розрядниками?
9. Що таке коефіцієнт імпульсу β і від чого залежить його величина?
10. Які основні елементи ГІН-500?
11. Як регулювати амплітуду вихідної напруги ГІН?
12. Які заходи безпеки передбачені при виконанні лабораторної роботи?

Лабораторна робота №4

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ ВЗДОВЖ ПОВЕРХНІ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Мета роботи:

- дослідження електричної міцності ізоляційних конструкцій з комбінованою ізоляцією в неоднорідних електричних полях при дії на ізоляцію змінної напруги промислової частоти і розвитку розряду по поверхні твердого діелектрика.

Основні завдання роботи

- одержати експериментальні значення розрядних напруг і напруженостей в конструкціях з комбінованою ізоляцією, неоднорідне електричне поле в яких має переважаючу тангенційну складову;
- одержати експериментальні значення розрядних напруг і напруженостей в конструкціях з комбінованою ізоляцією, неоднорідне електричне поле в яких має переважаючу нормальну складову;
- провести статистичну обробку результатів досліджень;
- порівняти одержані експериментальні результати з результатами, одержаними згідно існуючим аналітичним залежностям;
- вивести на основі одержаних експериментальних даних емпіричні формули для визначення електричної міцності досліджуваних ізоляційних проміжків.

Теоретичні відомості

Широке використання в електроустановках високої напруги ізоляторів, які мають міжелектродні проміжки з комбінацією твердих та газоподібних діелектриків, викликає необхідність дослідження електричної міцності газів з урахуванням впливу діелектричної поверхні.

Як правило, в цих проміжках створюється неоднорідне електричне поле.

Виходячи з умови координації ізоляції пробій має відбуватися у досліджуваному проміжку з газоподібним середовищем. У випадку роботи таких проміжків у повітрі на електричну міцність повітря при розряді по поверхні твердих діелектриків впливають: конфігурація електричного поля, форма діючої напруги, довжина міжелектродного проміжку, властивості діелектрика та стан його поверхні.

Характер розряду і розрядні напруги по поверхні твердого діелектрика в умовах неоднорідного електричного поля в значній мірі визначаються впливом тангенційної та нормальної складових напруженостей електричного поля.

Якщо переважає тангенційна складова напруженості електричного поля (рис.4.1, б-г), то розрядні напруги по поверхні є дещо меншими за розрядні напруги у повітряних проміжках між аналогічними за формою електродами (рис.4.1,а), що пояснюється присутністю на поверхні діелектрика адсорбованої плівки води та мікрозазорами між поверхнями електродів та діелектрика.

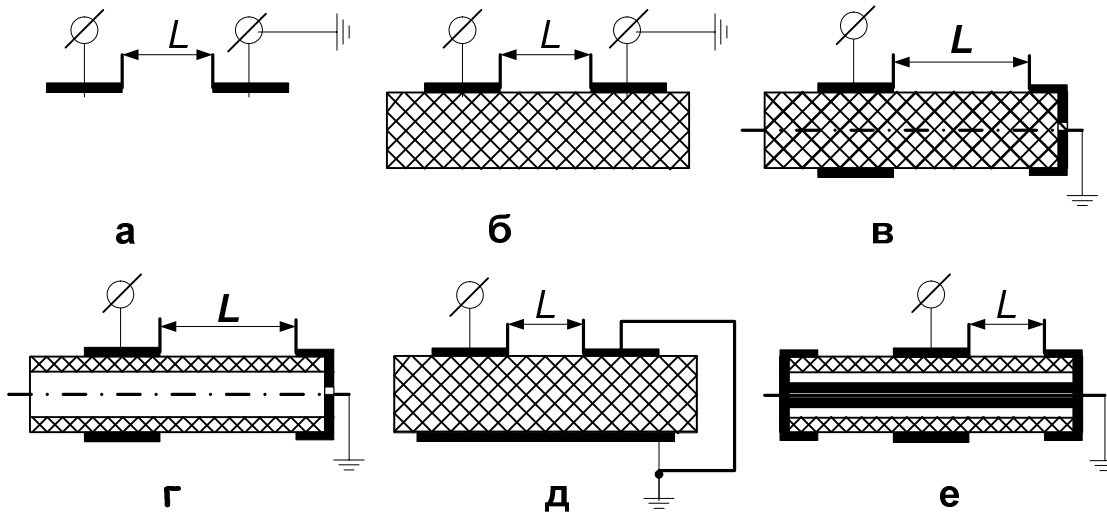


Рис.4.1. Міжелектродні проміжки для дослідження перекриття по поверхні твердого діелектрика

- - твердий діелектрик;
- - металеві електроди.

У випадку наявності значної нормальної складової напруженості електричного поля (рис.4.1, д- е), розрядні напруги та напруженості є значно меншими, аніж у випадку переважаючої тангенційної складової електричного поля. Це пояснюється наступними особливостями фізики розвитку розряду.

При відносно невеликій напрузі біля електродів спостерігається корона, яка охоплює певну площу поверхні діелектрика включно з коронуючим електродом. Збільшення напруги супроводжується появою слабопровідних каналів, що світяться (стрімерів), котрі при подальшому підвищенні напруги перетворюються у ковзні розряди, які характеризуються значно більшими провідністю та світінням. Це означає утворення біля поверхні діелектрика плазмового електроду, який збільшує площу первісно коронуючого.

В ковзних розрядах протікає значний струм, зумовлений процесом іонізації повітря. Цей струм у значній мірі є залежним від площі плазмового електроду.

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

$$U_{\kappa} = \frac{1,35 \cdot 10^{-4}}{C_{\Pi}^{0,45}}, \quad (4.1)$$

де C_{Π} - питома поверхнева ємність, тобто ємність 1см^2 поверхні, по якій розвивається розряд, по відношенню до протилежного електроду, $\Phi/\text{см}^2$.
де C_{Π} виражене у $\text{пФ}/\text{см}^2$.

При незначній товщині діелектрика питома поверхнева ємність для випадку плаского конденсатора ($\Phi/\text{см}^2$) визначається за формулою

$$C_{\Pi} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\Delta}, \quad (4.2)$$

де Δ - товщина діелектрика, см, $\varepsilon, \varepsilon_0$ - відносна та абсолютна діелектричні проникності.

Формула є достатньо точною для $C_{\Pi} \geq 0,25 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}/\text{см}^2$.

Падіння напруги у ковзному розряді є незначним, тому високий потенціал електроду переноситься вглибину проміжку. При цьому розвиток розряду полегшується, бо довжина каналів ковзного розряду збільшується за рахунок підвищення напруженості у неперекритій частині проміжку та зростання температури в каналах, тому процес швидко завершується повним перекриттям діелектричної конструкції.

Довжину каналу ковзного розряду $l_{\text{ковз}}$ (см) в залежності від прикладеної напруги U та питомої поверхневої ємності можна визначити за емпіричною формулою Теплера:

$$l_{\text{ковз}} = k C_{\Pi}^2 U^5 \sqrt{\frac{dU}{dt}}, \quad (4.3)$$

де k – коефіцієнт, що визначається дослідним шляхом; U – діюча напруга [кВ], $\frac{dU}{dt}$ - максимальна швидкість зростання напруги $u(t)$.

Якщо в формулі (4.3) замість $l_{\text{ковз}}$ взяти відстань L між електродами по поверхні та вважати напругу $u(t)$ синусоїдальною функцією часу, то напруга перекриття проміжку U_p буде дорівнювати

$$U_p = \chi L^{0,2} \left(\frac{\Delta}{\varepsilon}\right)^{0,4}, \quad (4.4)$$

де $\chi = \text{const}$ (у випадку напруги промислової частоти $\chi \approx 58$ для $L \geq 5\text{см}$.)

У загальному випадку розрядну напругу по поверхні наближено можна визначити як

$$U_p = k \left(\frac{\Delta}{\varepsilon} \right)^m L^n, \quad (4.5)$$

де L — відстань між електродами по поверхні, см; Δ - товщина діелектрика, см; ε - відносна діелектрична проникність діелектрика; k, m, n — коефіцієнти, які залежать від особливостей конструкції ізоляційного проміжку та діапазону зміни відстані між електродами по поверхні.

Зволоження та забруднення поверхні діелектрика значно знижують величину розрядної напруги.

Експериментальний стенд та методика виконання роботи

Принципова схема експериментального стенду представлена на рис.4.2. Джерелом високої напруги промислової частоти є випробувальний трансформатор Т1 типу ИОМ – 100/25 номінальною напругою 100 кВ та потужністю 25 кВА. Значення високої напруги цього трансформатора можна визначити як за допомогою показань вольтметра PV1 (враховуючи коефіцієнт трансформації 100000/200), так і вольтметра PV2 з коефіцієнтом трансформації 100000/100 (який приєднаний до спеціальної вимірювальної обмотки випробувального трансформатора на стороні високої напруги). Варто пам'ятати, що при вимірюваннях одержують діючі значення напруги.

Високовольтний резистор R призначений для обмеження струму розряду, що необхідно для захисту трансформатора від перевантажень.

Плавне регулювання напруги трансформатора Т1 здійснюється регулятором напруги Т2.

Вмикання стенду здійснюється за допомогою контактів рубильника видимого розриву S1, контактів автоматичного вимикача SF, та нормально розімкнених контактів кнопки КН2 «ПУСК» за умови замкнених контактів блокування дверей КБ1, що ведуть на поле випробувального стенду та контактів КБ2 блокування штанги ручного переносного заземлювача. При включенні контактів кнопки КН2 через котушку К1 магнітного пускача протікає струм і його контакти К1.1 та К1.2 замикаються. При цьому регулюючий трансформатор Т1 одержує живлення завдяки замкненню контакту К1.2, а контакт КН2 стає на самоблокування, тобто, кнопка може бути розімкнена при збереженні живлення котушки К1. Вимикання живлення котушки К1, а відповідно, контакту К1.1 може відбутися при розмиканні нормально замкнених контактів кнопки КН1 «СТОП», або контактів КБ1 та КБ2.

Підвищення вихідної напруги Т2 здійснюється його регулятором, причому в установці задіяне блокування (не показано на схемі) від вмикання високої напруги «поштовхом», завдяки якому підключення Т1 здій-

снюється тільки в тому випадку, коли регулятор T2 знаходиться в початковому, «нульовому» положенні.

Штатне вимкнення високовольтного живлення стенду може бути здійснене кнопкою КН1 «СТОП» при незначній потужності розряду, або автоматично вимикачем SF при її збільшенні.

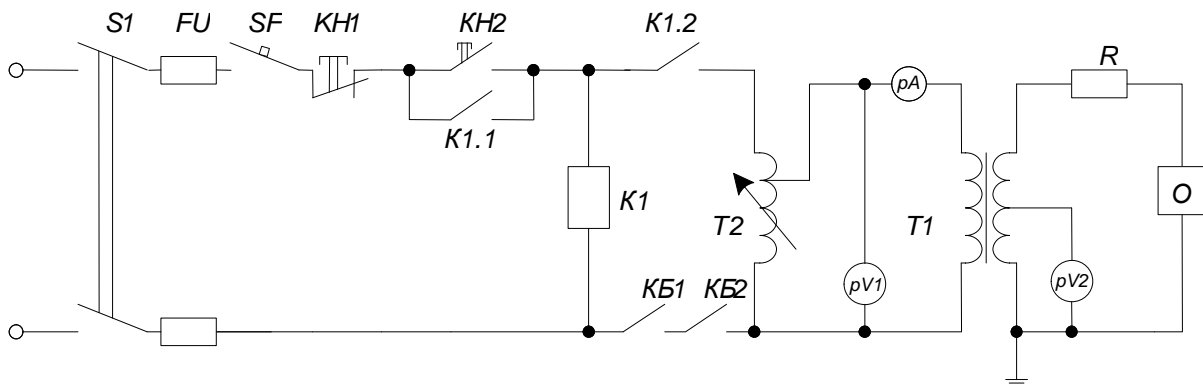


Рис.4.2. Схема експериментального стенду

Доступ до випробуваних електродних збірок, які розташовані на випробувальному полі на ізолюючій конструкції, можливий тільки при цілком відключеному стенді та накладеному на високовольтний вивід обмотки трансформатора T1 переносному заземлювачі.

Значення розрядної напруги слід фіксувати при повному перекритті ізоляційного проміжку першим іскровим каналом.

При проведенні досліджень згідно програми, яку визначає викладач, встановлюються певні відстані між електродами для різних конфігурацій електричного поля та визначаються розрядні напруги та середні розрядні напруженості досліджуваних проміжків. Кількість дослідів при кожній відстані міжелектродних проміжків становить 5.

Має бути проведено статистичну обробку результатів досліджень.

Результати досліджень слід заносити у таблиці.

За результатами досліджень мають бути побудовані графіки залежностей розрядних напруг та напруженостей від відстані між електродами при врахуванні статистичних відхилень, а також розраховані витримувані напруги (Додаток 1).

Завдання

Вивчити основні теоретичні положення електричного розряду в повітрі по поверхні твердих діелектриків.

Вивчити схему та методику роботи на дослідному стенді.

Вивчити правила техніки безпеки при роботі на дослідному стенді.

Експериментально одержати значення розрядних напруг і напруженостей в електродних збірках згідно програми досліджень, яку визначає викладач.

Виконати згідно Додатку 1 статистичну обробку отриманих даних шляхом розрахунку оцінки середнього квадратичного відхилення σ_0 та границь довірчого інтервалу ε випадкової похибки результату спостереження розрядної напруги об'єкту спостереження з імовірністю $P=0,95$. Значення величин обробки результатів занести в табл. 4.1. Визначити витримувану напругу для кожного розрядного проміжку $U_{\text{вит}}$.

Для розрядних напруг в дослідному інтервалі відстані встановити аналітичні залежності $U_p=f(L)$, з результатів яких побудувати розрахункові криві.

Табл. 4.1 Результати експериментів та розрахунків

Форма розрядного проміжку	Довжина розрядного проміжку по поверхні L, см	Розрядна напруга, U_p , кВ					$U_{\text{сер}}$, кВ	$\sigma(U_{\text{сер}})$	ε	$U_{\text{сер}}$, кВ	$U_{\text{вит}}$, кВ	$E_{\text{сер}}$, кВ/см
		Номер досліду										
		1	2	3	4	5						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

Контрольні запитання

1.3 якими реальними ізоляційними конструкціями можна порівняти досліджувані в роботі міжелектродні проміжки?

2. Які фізичні умови призводять до появи ковзних розрядів?

Як залежить електрична міцність по поверхні твердого діелектрика від його матеріалу у випадку переважаючої нормальної складової електричного поля?

3. Як залежить електрична міцність по поверхні твердого діелектрика у випадку переважаючої нормальної складової електричного поля від його товщини?

4. Як залежить електрична міцність по поверхні у випадку переважаючої нормальної складової електричного поля від довжини міжелектродного проміжку по поверхні?

5. Як визначається питома поверхнева ємність ізоляційної конструкції?

6. Як впливає величина питомої поверхневої ємності на величину початку ковзних розрядів?

7. Як визначається розрядна напруга по поверхні твердого діелектрика у випадку переважаючої нормальної складової електричного поля?

8. Чи будуть відрізнятися напруги поверхневого розряду у випадках двох прохідних ізоляторів з однаковою довжиною розрядного шляху по поверхні L , але з різними діаметрами?

9. Які методи використовуються для збільшення поверхневої електричної міцності в ізоляційних конструкціях у випадку переважаючої нормальної складової електричного поля ?

Лабораторна робота № 5

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛЕННЯ НАПРУГИ ПО ГІРЛЯНДІ ІЗОЛЯТОРІВ

Мета роботи

Дослідження розподілення змінної напруги по гирлянді підвісних ізоляторів за допомогою іскрового проміжку з постійною відстанню між кулями.

Завданням роботи є експериментальне визначення і оцінка розподілення змінної напруги по гирлянді підвісних ізоляторів за допомогою іскрового проміжку з постійною відстанню між кулями та визначення за представленою методикою пошкодженого в гирлянді ізолятора.

Теоретичні відомості

Для закріплення проводів повітряних ліній (ПЛ) електропередачі високої напруги використовують послідовно з'єднані в гирлянди тарілчасті ізолятори.

Підвісні тарілчасті ізолятори виготовляють із електротехнічного фарфору або скла. Будова тарілчастого ізолятора показана на рис.5.1 Головка діелектричного тіла (“тарілка”) ізолятора армована зовні металевою шапкою .

В середині головки розміщений сталевий стрижень.

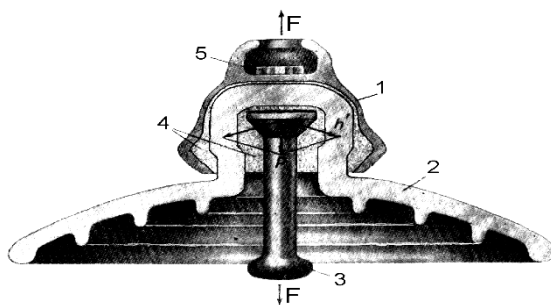


Рис.5.1 Тарілчастий ізолятор: 1 – шапка; 2 – ізолююча деталь (тарілка); 3 – стрижень; 4 – закріплююче закладення; 5 – замок .

Змінна та імпульсна напруги розподіляються по ізоляторах гирлянди нерівномірно. Зі збільшенням числа ізоляторів у гирлянді нерівномірність зростає. Якщо не прийняти спеціальних заходів, на лініях високої напруги частина ізоляторів у гирляндах може виявитися під такою напругою, що на цих ізоляторах уже при робочій напрузі і нормальних атмосферних умовах виникне корона, що з'явиться джерелом радіоперешкод і причиною корозії арматури та викличе додаткові втрати енергії.

Правила улаштування електроустановок, див. табл. 5.1, передбачають при відсутності підвищених забруднень наступну кількість елементів (ізоляторів) у гірлянді при різній номінальній напрузі.

Таблиця 5.1 Кількість підвісних ізоляторів у гірляндах

На- пруга повіт- ряної лінії, кВ	ПФ-6А, ПФ-6Б, ПФ-6У, ПС-6А		ПС-11		ПФ-11, ПФ- 16А, ПС-16А, ПС-16Б		ПФ-20А, ПС- 22А		ПС-30А	
	Кількість ізоляторів у гірлянді									
	підтри- муючий	натя- жний	підтри- муючий	натя- жний	підтри- муючий	натя- жний	підтри- муючий	натя- жний	підтри- муючий	натя- жний
35	3	4	3	4						
110	7	8	7	7	6					
150	9	10	8	8	8	—	8	9	—	—
220	13	14	12	12	11-12	11-12	10	10	11	11

Примітка. При застосуванні дерев'яних опор кількість ізоляторів у гірлянді зменшують на один елемент. Кількість ізоляторів у гірляндах збільшують на один елемент для напруг до 150 кВ при будівництві ліній на висоті 1000—2500 м над рівнем моря й для напруг 220 кВ при висоті 1000—2000 м над рівнем моря.

На рис. 5.2 представлена схема заміщення гірлянди ізоляторів, на якій ізолятори представлені ємностями. При включенні гірлянди ізоляторів на змінну напругу кожний елемент можна представити деякою ємністю заміщення $C_3=30...70$ пФ, див. рис. 5.2. Крім того, кожний ізолятор буде мати деяку ємність стосовно землі $C_1=4...5$ пФ і ємність до струмопроводу $C_2=0,5...1$ пФ.

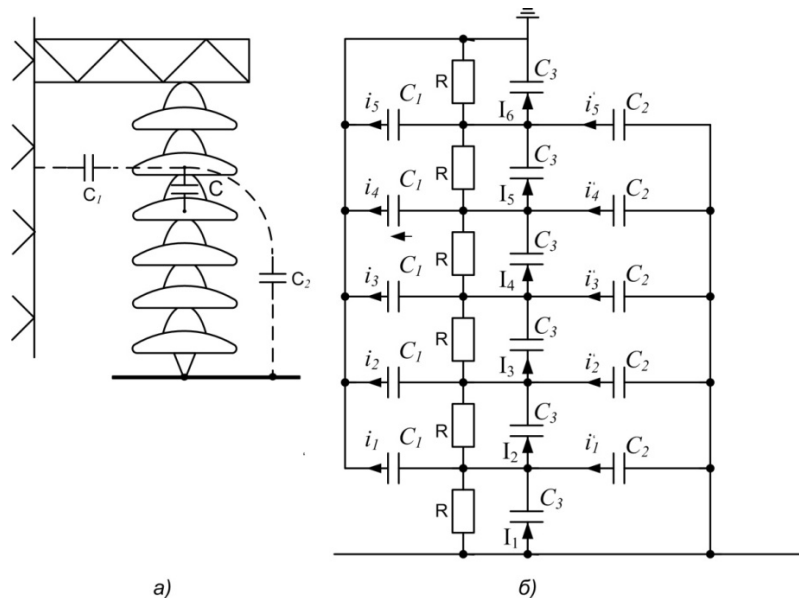


Рис. 5.2 Гірлянда ізоляторів (а) та її схема заміщення (б)

У разі чистої і сухої поверхні ізолятора опір R його витoku значно перевищує його ємнісний опір $1/\omega C$, тому при аналізі розподілення напру-

ги уздовж сухої гірлянди не враховується, і розподілення напруги залежить тільки від ємностей C_3 , C_1 і C_2 .

Струми які проходять через ємності C_1 і C_2 , можна назвати поперечними, а струм по ланцюжку ємностей C_3 - поздовжнім струмом. Якщо накласти поздовжні й поперечні ємнісні струми гірлянди, то неважко побачити, що в найближчому до струмопроводу вузлі величина струму, що відгалужується на землю через ємність C_1 , буде більше величини струму, що протікає від струмопроводу через ємність C_2 .

Тому поздовжній струм у другому від струмопроводу ізоляторі гірлянди буде менше поздовжнього струму, що протікає в першому ізоляторі. В останніх, ближчих до траверси, ізоляторах гірлянди співвідношення величини ємнісних струмів на землю і на провід може виявитися іншим: поперечні струми на землю, що відтікають через ємність C_1 можуть виявитися менше поперечних струмів від струмопроводу через ємність C_2 ; різниця їх збільшить поздовжній струм, що протікає через ємність ізолятора, найближчого до траверси, внаслідок чого спадання напруги на ньому зростає.

Ступінь нерівномірності розподілу напруги ΔU по елементах гірлянди залежить від відношення C_1/C_3 . Чим менше це відношення тим більш рівномірними будуть навантажені ізолятори, тобто слабшає вплив поперечних ємнісних струмів гірлянди на її поздовжній ємнісний струм по ланцюжку ізоляторів. Відношення C_2/C_3 робить значно менший вплив на розподілення напруги по елементах через менше значення C_2 у порівнянні із C_1 .

Чим більше ємність C_3 ізолятора гірлянди, тим більш рівномірним є розподілення напруги по її елементах.

Високі напруженості поля на ізоляторах поблизу струмопроводу можуть приводити до коронування, що викликає старіння ізоляційного тіла ізолятора, окисні процеси на металевих арматурах.

Є кілька шляхів поліпшення розподілу напруженості по елементах гірлянди:

- Застосовують ізолятори з великою власною ємністю, наприклад скляні.
- Використовують ізолятори, покриті напівпровідною глазур'ю, що збільшує активну складову поздовжнього струму гірлянди й знижує вплив поперечних ємнісних струмів.
- Застосовують захисну арматуру у вигляді екранних кілець, рогів, вісімок, яку монтують на обох або тільки на лінійному кінці гірлянди.

У лабораторних умовах вимірювання розподілення напруги уздовж гірлянди проводиться за допомогою сферичного розрядника з незмінною відстанню між його електродами. Вимірювальний розрядник не повинен вносити суттєвих змін в електричне поле гірлянди, для чого його ємність повинна бути значно меншою ємності окремого ізолятора.

Розрядник по черзі підключається паралельно кожному ізолятору гірлянди. До струмопроводу підводиться напруга від випробувального трансформатора, яка підвищується від нуля до появи розряду в іскровому проміжку розрядника. Якщо U_P — пробивна напруга розрядника, а U_i — напруга, підведена до струмопроводу, при якій стався пробій іскрового проміжку розрядника, закріпленого на i -м ізоляторі гірлянди, то напруга на кожному ізоляторі у відсотках від підведеної до струмопроводу складе:

$$a_1 = \frac{U_P}{U_1} \cdot 100 \quad (5.1)$$

$$a_2 = \frac{U_P}{U_2} \cdot 100 \quad (5.2)$$

.....

$$a_i = \frac{U_P}{U_i} \cdot 100 \quad (5.3)$$

З (5.1) маємо:

$$U_P = \frac{a_1 U_1}{100} \quad (5.4)$$

Підставляючи (5.4) у (5.2), (5.3), знаходимо

$$a_2 = a_1 \frac{U_1}{U_2}$$

.....

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

Враховуючи, що

$$a_1 + a_2 + \dots + a_i + \dots + a_n = 100,$$

отримуємо

$$a_1 + a_1 \frac{U_1}{U_2} + a_1 \frac{U_1}{U_3} + \dots + a_1 \frac{U_1}{U_n} = 100,$$

звідки

$$a_1 = \frac{100}{1 + \frac{U_1}{U_2} + \frac{U_1}{U_3} + \dots + \frac{U_1}{U_n}} \quad (5.5)$$

Аналогічно можливо одержати вирази

$$a_2 = \frac{100}{1 + \frac{U_2}{U_1} + \frac{U_2}{U_3} + \dots + \frac{U_2}{U_n}} ; \quad (5.6)$$

$$\dots\dots\dots$$

$$a_i = \frac{100}{\frac{U_i}{U_1} + \frac{U_i}{U_2} + \dots + \frac{U_i}{U_i} + \dots + \frac{U_i}{U_n}} . \quad (5.7)$$

Розглянута методика дослідження при дотриманні основного допущення про незалежність характеру розподілення напруги по гірлянді від величини прикладеного до струмопроводу напруги. Тут не враховується вплив на розподілення напруги по гірлянді корони на струмопроводі ПЛ та в місцях з'єднання елементів гірлянди. Визначення розподілення напруги по гірлянді фарфорових ізоляторів використовується для знаходження дефектних ізоляторів.

При наявності дефектного («нульового») ізолятора в гірлянді розподілення напруги по елементах гірлянди стане більш нерівномірним (рис5.3), що може викликати перебиття гірлянди.

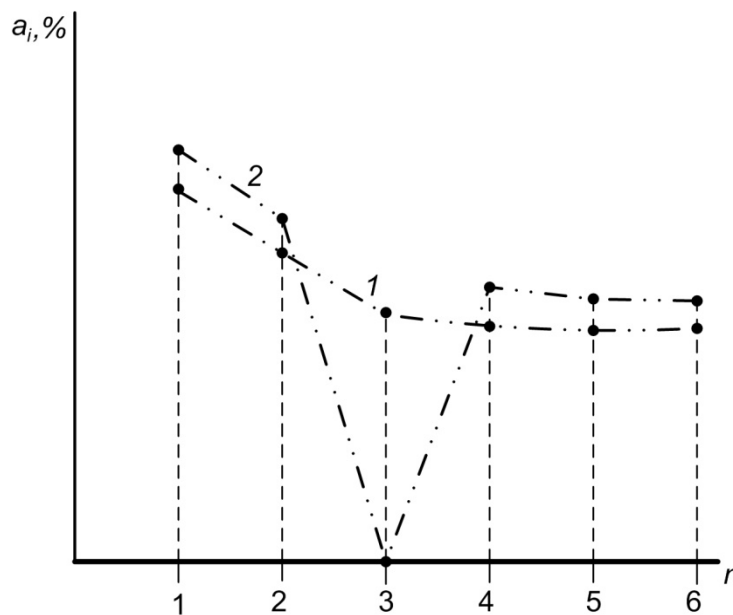


Рис. 5.3 Розподілення напруги по гірлянді ізоляторів без дефектного (1) та з дефектним (2) (пробитим) ізолятором

Експериментальна установка та методика виконання роботи

На рис.5.4 наведена схема експериментальної установки. Джерелом високої змінної напруги є випробувальний трансформатор Т1 типу ИОМ-

100/25 потужністю 25 кВА, з номінальними напругами $U_{\text{нн}} = 200 \text{ В}$; $U_{\text{вн}} = 100 \text{ кВ}$. Значення високої напруги цього трансформатора можна визначити як за допомогою показань вольтметра pV_1 (враховуючи коефіцієнт трансформації 100000/200), так і вольтметра pV_2 з коефіцієнтом трансформації 100000/100 (який приєднаний до спеціальної вимірювальної обмотки випробувального трансформатора на стороні високої напруги). Варто пам'ятати, що при вимірюваннях одержують діючі значення напруги.

Високовольтний резистор R призначений для обмеження струму розряду, що необхідно для захисту трансформатора від перевантажень.

Плавне регулювання напруги трансформатора $T1$ здійснюється регулятором напруги $T2$.

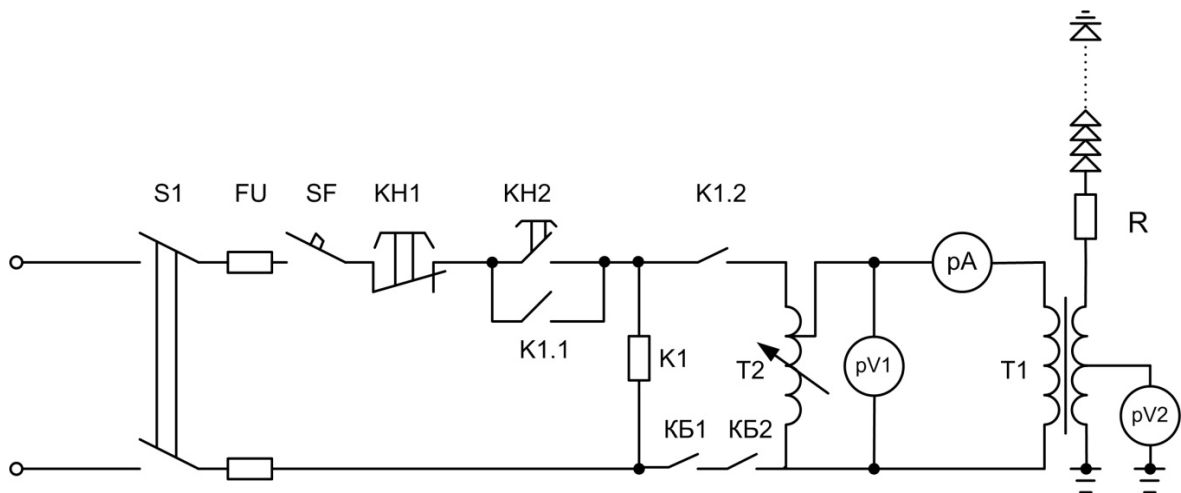


Рис.5.4 Схема експериментального стану

Вмикання стану здійснюється за допомогою контактів рубильника видимого розриву $S1$, контактів автоматичного вимикача SF , та нормально розімкнених контактів кнопки $KH2$ «ПУСК» за умови замкнених контактів блокування дверей $KB1$, що ведуть на поле випробувального стану та контактів $KB2$ блокування штанги ручного переносного заземлювача. При включенні контактів кнопки $KH2$ через котушку $K1$ магнітного пускача протікає струм і його контакти $K1.1$ та $K1.2$ замикаються. При цьому регулюючий трансформатор $T1$ одержує живлення завдяки замкненню контакту $K1.2$, а контакт $KH2$ стає на самоблокування, тобто, кнопка може бути розімкнена при збереженні живлення котушки $K1$. Вимикання живлення котушки $K1$, а відповідно, контакту $K1.1$ може відбутися при розмиканні нормально замкнених контактів кнопки $KH1$ «СТОП», або контактів $KB1$ та $KB2$.

Підвищення вихідної напруги $T2$ здійснюється його регулятором, причому в установці задіяне блокування (не показано на схемі) від вмикання високої напруги «поштовхом», завдяки якому підключення $T1$ здій-

снюється тільки в тому випадку, коли регулятор Т2 знаходиться в початковому, «нульовому» положенні.

Штатне вимкнення високовольтного живлення стенду може бути здійснене кнопкою КН1 «СТОП» при незначній потужності розряду, або автоматично вимикачем SF при її збільшенні.

Доступ до гірлянди ізоляторів можливий тільки при цілком відключеному стенді та накладеному на високовольтний вивід обмотки трансформатора Т1 переносному заземлювачі.

Значення розрядної напруги слід фіксувати при розряді кульового розрядника.

Заходи безпеки під час виконання лабораторної роботи

Робота на високовольтному стенді дозволяється лише під наглядом викладача. Вхід на високовольтне поле стенду - тільки при цілком відключеному стенді та накладеному на високовольтний вивід обмотки трансформатора Т1 переносному заземлювачі, всі операції на полі, в т.ч. по встановленню кульового розрядника на гірлянду ізоляторів виконувати тільки при накладанні переносного заземлювача на високовольтний вивід випробувального трансформатора.

Перед виходом на поле необхідно переконатись в тому, що рукоятка автотрансформатора знаходиться у положенні мінімальної напруги, а рубильник видимого розриву і контактори вимкнені.

Всі роботи на випробувальному полі, а також встановлення переносного заземлювача необхідно проводити тільки в діелектричних рукавичках.

1. Встановити на гірлянду ізоляторів екранне кільце. Далі кульовий розрядник встановлюється на першому, найближчому до струмопроводу елементі гірлянди із шести ізоляторів типу ПФ-6А. Залишаючи поле, слід зняти з високовольтного виводу переносний заземлювач і щільно закрити за собою двері. Після ввімкнення установки слід плавно підвищувати напругу на струмопроводі до появи розряду в іскровому проміжку. При цьому слід зафіксувати показання вольтметра $pV_1(U_i)$. Дослід повторити 5 разів, після чого переставити розрядник на наступний i - ізолятор гірлянди.

Результати вимірів заносяться в табл.5.2. Обробку результатів виконати за параметрами таблиці 5.2 та Додатком 1.

2. Встановити на одному з ізоляторів гірлянди шунтуючу закоротку, яка імітує пошкоджений ізолятор. Далі повторити досліди згідно п.1. Результати вимірів та їх обробку занести в табл. 5.2.

3. Зняти екранне кільце з гірлянди ізоляторів та повторити досліди згідно п.1. Результати вимірів та їх обробку занести в табл. 5.2.

4. Зняти шунтуючу закортку, яка імітує пошкоджений ізолятор, та повторити досліди згідно п.1. Результати вимірів та їх обробку занести в табл. 5.2.

5. За результатами експериментів, отриманим при виконанні пп.1 - 4, побудувати графіки розподілення напруги a_i у гірлянді ізоляторів 110 кВ з урахуванням статистичної обробки експериментальних даних за Додатком 1.

6. На підставі аналізу отриманих даних зробити висновки по лабораторної роботі.

Контрольні запитання

1. Чому розподіл змінної напруги уздовж гірлянди однотипних ізоляторів нерівномірний?

2. Як впливають співвідношення C_1/C_3 та C_2/C_3 на розподілення напруги U_i по елементах гірлянди ізоляторів?

3. Поясніть методику знаходження «нульового» ізолятора в гірлянді?

4. Поясніть методику вимірювання розподілення напруги U_i по елементах гірлянди ізоляторів?

5. Що впливає на розподілення напруги уздовж гірлянди ізоляторів?

6. Які методи вирівнювання напруги уздовж гірлянди ізоляторів ви знаєте?

7. Як змінюється найбільше падіння напруги на ізоляторах в залежності від їх розташування в гірлянді?

8. Який характер має розподілення напруги уздовж ізоляторів гірлянди при дощі в порівнянні зі розподілом напруги по цій гірлянді при сонячній погоді?

Таблиця 5.2 Експериментальні дані вимірів для п'яти спостережень

Напруга розряду U_i , В/ Розрахункові значення a_i (%)										
Експериментальні дані при наявності екрануючого кільця										
№ і-ізолятора	U_{i1} a_{i1}	U_{i2} a_{i2}	U_{i3} a_{i3}	U_{i4} a_{i4}	U_{i5} a_{i5}	$\bar{a}_i, \%$	$\tilde{\sigma}_n(\bar{a}_i)$	$ \varepsilon_i $	$\bar{a}_i - \varepsilon_i $	$\bar{a}_i + \varepsilon_i $
1	/	/	/	/	/					
2	/	/	/	/	/					
3	/	/	/	/	/					
4	/	/	/	/	/					
5	/	/	/	/	/					
6	/	/	/	/	/					
Експериментальні дані при наявності екрануючого кільця та при дефектному ізоляторі №										
№ і-ізолятора	U_{i1} a_{i1}	U_{i2} a_{i2}	U_{i3} a_{i3}	U_{i4} a_{i4}	U_{i5} a_{i5}	$\bar{a}_i, \%$	$\tilde{\sigma}_n(\bar{a}_i)$	$ \varepsilon_i $	$\bar{a}_i - \varepsilon_i $	$\bar{a}_i + \varepsilon_i $
1	/	/	/	/	/					
2	/	/	/	/	/					
3	/	/	/	/	/					
4	/	/	/	/	/					
5	/	/	/	/	/					
6	/	/	/	/	/					
Експериментальні дані без екрануючого кільця та при дефектному ізоляторі №										
№ і-ізолятора	U_{i1} a_{i1}	U_{i2} a_{i2}	U_{i3} a_{i3}	U_{i4} a_{i4}	U_{i5} a_{i5}	$\bar{a}_i, \%$	$\tilde{\sigma}_n(\bar{a}_i)$	$ \varepsilon_i $	$\bar{a}_i - \varepsilon_i $	$\bar{a}_i + \varepsilon_i $
1	/	/	/	/	/					
2	/	/	/	/	/					
3	/	/	/	/	/					
4	/	/	/	/	/					
5	/	/	/	/	/					
6	/	/	/	/	/					
Експериментальні дані без екрануючого кільця										
№ і-ізолятора	U_{i1} a_{i1}	U_{i2} a_{i2}	U_{i3} a_{i3}	U_{i4} a_{i4}	U_{i5} a_{i5}	$\bar{a}_i, \%$	$\tilde{\sigma}_n(\bar{a}_i)$	$ \varepsilon_i $	$\bar{a}_i - \varepsilon_i $	$\bar{a}_i + \varepsilon_i $
1	/	/	/	/	/					
2	/	/	/	/	/					
3	/	/	/	/	/					
4	/	/	/	/	/					
5	/	/	/	/	/					
6	/	/	/	/	/					

Лабораторна робота № 6

ДОСЛІДЖЕННЯ НА МОДЕЛЯХ ЗОН ЗАХИСТУ СТРИЖНЕВИХ БЛИСКАВКОВІДВОДІВ

Мета роботи

- (1) Ознайомитися з інженерними методиками розрахунку зон блискавкозахисту одно- та двострижневих систем згідно нормативних документів.
- (2) Виконати модельні дослідження зон захисту на лабораторному стенді ГІН-500 кВ.

Теоретичні відомості

При прямому ураженні електроустановки блискавкою перенапруги найчастіше перевищують рівень його ізоляції і викликають її пробій або поверхневе перекриття. В ізоляції утворюється провідний канал, по якому спочатку проходить струм блискавки, а потім може протікати струм промислової частоти, що підтримується джерелами енергосистеми (для систем із заземленою нейтраллю - це струм короткого замикання).

Через високу вартість станційного обладнання і труднощі ліквідації наслідків короткого замикання правила улаштування електроустановок вимагають, щоби були виключені прямі розряди блискавки (ПРБ) в устаткування й шини підстанції. Захист підстанцій від ПРБ здійснюється вертикальними стрижневими та тросовими блискавковідводами. В даній роботі розглядаються стрижневі блискавковідводи.

Розглянемо найпоширенішу ситуацію, яка зустрічається в питаннях захисту від блискавок: негативний лідер розвивається від хмари в бік землі. Грозава хмара й лідер блискавки, що з неї опускається (рис. 6.1), індукують на землі і різноманітних об'єктах заряди протилежного знаку. На частинах об'єктів, що знаходяться над землею, виникає висока напруженість електричного поля, яка може досягти рівнів, що достатні для іонізації повітря і розвитку зустрічних лідерів.

Лідер блискавки та зустрічні лідери можуть розвиватися і зблизитися до повного контакту. В основу принципу дії так званого зовнішнього блискавкозахисту якраз і покладено взаємодію цих лідерів: систему блискавкоприймачів необхідно розташувати таким чином, щоби зустрічні лідери з них «перехопили» лідер блискавки і не «пропустили» його до об'єктів за-

хисту; далі струм блискавки відводиться за допомогою струмовідводів до заземлювачів.

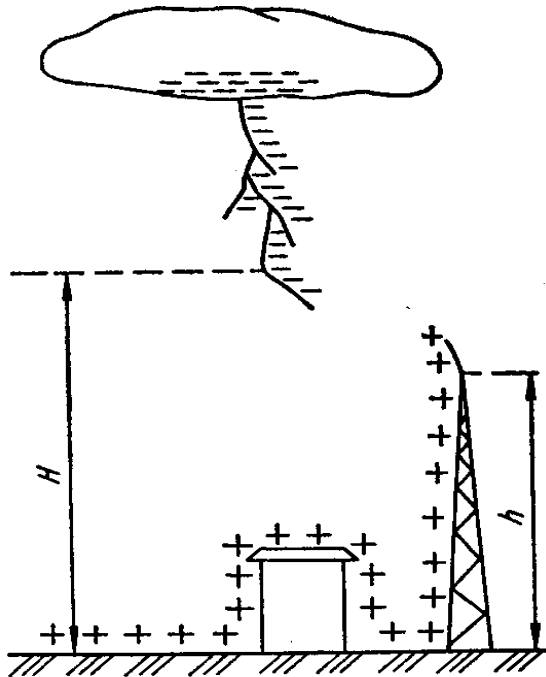


Рис. 6.1. Розвиток блискавки і зустрічного лідера

Висота, з якої лідер починає орієнтуватися на найбільш високий заземлений об'єкт, називається висотою орієнтування блискавки. В літературі також можна знайти вирази для розрахунку так званого радіусу притягання блискавки, тобто відстані, з якої вона орієнтується на об'єкт [3].

При значних висотах блискавковідводу (або об'єкта) на його вершині індукується великий заряд, напруженість поля різко зростає, іонізація охоплює всю верхню частину блискавковідводу, і вибіркові властивості блискавки потрапити саме у вершок блискавковідводу значно слабшають. Тому в задачах розрахунку зон захисту для блискавковідводу приймають певну ефективну висоту, яка дещо менша за його фактичну повну висоту.

Надійність блискавкозахисту (P_3) пов'язують з числом β проривів блискавки за 1 рік на захищений об'єкт або числом років $M = \frac{1}{\beta}$, за який очікується один прорив блискавки в зону захисту. Очевидно, що $\beta = \psi N$, де ψ - ймовірність прориву в зону захисту ($\psi = 1 - P_3$); N - сумарна кількість розрядів за 1 рік у блискавковідводи, що захищають об'єкт, і в самий об'єкт.

Ймовірність ψ прориву блискавки на об'єкт особливо велика при його розташуванні на краю зони захисту. Чим «глибше» знаходиться об'єкт, тим ця ймовірність менша. Найменша ймовірність прориву блискавки на об'єкт відповідає його розміщенню в глибині внутрішньої частини зони захисту багатократних блискавковідводів. Для відкритих розподільних улаштувань (ВРУ) станцій і підстанцій, а також для підсобних споруджень вважаються достатніми зони захисту, визначені з ймовірністю прориву $\psi \leq 10^{-2}$. Для шинопроводів високої відповідальності і вводів апаратів використовуються зони захисту з ймовірністю $\psi \leq 10^{-3}$.

Зони блискавкозахисту одно- та двострижневих систем в лабораторній роботі пропонується розраховувати на основі Інструкції з блискавкоза-

хисту [1] (залишається чинною в Росії поряд з новішими нормами) та ДСТУ Б В.2.5.-38:2008 [4], який введено з січня 2009 року. В [4] частково враховані положення міжнародних стандартів. Вимоги цього стандарту розповсюджуються на проектування, будівництво, реконструкцію і експлуатацію блискавкозахисту всіх видів будівель, споруд і промислових комунікацій незалежно від відомчої належності та форми власності. У разі, коли вимоги галузевих нормативних документів є більш жорсткими, ніж у цьому документі, при розробці блискавкозахисту рекомендується виконувати галузеві вимоги. В порядку ознайомлення рекомендується додатково розглянути також методики розрахунку зон захисту за старими нормами, деякі з яких описано в [2].

Зони захисту в документі [1] визначені на основі імовірнісного підходу. В ДСТУ Б В.2.5.-38:2008 [4], в частинах, які враховують міжнародні норми, зони захисту визначають за електрогеометричним підходом. В інших частинах – за ймовірнісним підходом. Необхідні для розрахунків в даній лабораторній роботі витяги з цих нормативних документів наведено нижче.

Згідно [4], класифікацію об'єктів здійснюють за небезпекою розрядів блискавки для самого об'єкта і його оточення. Об'єкти поділяються на звичайні та спеціальні.

Звичайні об'єкти (промислові підприємства, тваринницькі і птахівничі будівлі і споруди, житлові і адміністративні будівлі, універмаги, банки, страхові компанії, дошкільні установи, школи, лікарні, притулки для старих, музеї і археологічні пам'ятники, спортивні споруди тощо).

Спеціальні об'єкти:

- об'єкти, що становлять небезпеку для безпосереднього оточення (нафтопереробні підприємства, заправні станції, підприємства з виробництвом і зберіганням/ використанням вибухових речовин);

- об'єкти, що становлять екологічну небезпеку (хімічні заводи, атомні електростанції, біохімічні фабрики і лабораторії);

- об'єкти з обмеженою небезпекою (пожежонебезпечні підприємства, електростанції, підстанції і лінії електропередавання, засоби зв'язку);

- інші об'єкти (будови висотою вище 60 м, об'єкти, що будуються).

Необхідність виконання блискавкозахисту об'єкта від ПРБ і його рівень блискавкозахисту (РБЗ) визначаються за таблицею Додатку А в [4] в залежності від очікуваної кількості уражень об'єкта блискавкою за рік N , суспільного значення і тяжкості наслідків від дії блискавки.

Очікувана кількість уражень об'єкта блискавкою за рік N визначається за наступними формулами:

- для зосереджених споруд (димові труби, вежі, башти тощо):

$$N = 9\pi \cdot h_{об}^2 \cdot n \cdot 10^{-6} ; \quad (6.1)$$

- для будівель і споруд прямокутної форми:

$$N = [(S + 6h_{об})(L + 6h_{об}) - 7,7h_{об}^2] \cdot n \cdot 10^{-6}; \quad (6.2)$$

- для протяжного об'єкта довжиною L (лінії електропередавання, зв'язку тощо):

$$N = 6L \cdot h_{об} \cdot n \cdot 10^{-6}, \quad (6.3)$$

де $h_{об}$ – найбільша висота об'єкта, м; L – довжина об'єкта, м; S – ширина об'єкта, м; n – щільність ударів блискавки на 1 км^2 земної поверхні за рік, визначена за даними метеорологічних спостережень в місці розташування об'єкта, $1/\text{км}^2$ рік. Якщо дані спостережень відсутні n може бути приблизно розраховано за формулою

$$n = \frac{6,7T_{зр}}{100}, \frac{1}{\text{км}^2 \text{ рік}}, \quad (6.4)$$

де $T_{зр}$ - середня тривалість гроз у годинах, визначена за картами інтенсивності грозової діяльності (Додаток Б [4]) або за середніми багаторічними (не менш 10 років) даними метеостанції, найближчої до місця знаходження об'єкта.

Примітка. Для будівель і споруд складної конфігурації в якості S і L розглядається ширина і довжина найменшого прямокутника, в який може бути вписана будівля або споруда в плані.

В стандарті [4] передбачено чотири рівні блискавкозахисту (РБЗ I, II, III, IV). Для кожного РБЗ встановлені фіксовані параметри струму блискавки, в т.ч. максимальні (табл. 6.1 та 6.2) і мінімальні (табл. 6.3) значення амплітуди струму. Максимальні значення параметрів струму блискавки використовуються для розрахунків перерізу провідників (табл. 6.4); товщини металеві покрівлі і корпусів резервуарів, які можуть мати контакт з блискавкою; номінального розрядного струму пристроїв захисту від імпульсних перенапруг (ПЗП); роздільної (безпечної) відстані для запобігання небезпечного іскріння; визначення параметрів випробування системи блискавкозахисту або її окремих компонентів тощо. Мінімальні значення амплітуди струму блискавки використовуються для встановлення радіуса фіктивної сфери («сфери, що котиться», табл. 6.3), за допомогою якої може проводитись розрахунок блискавкоприймачів (об'єму захисту) і визначатися зона захисту від дії блискавок (O_A, O_B, I, \dots).

Таблиця 6.1 Параметри першого імпульсу струму блискавки

Параметр струму	РБЗ		
	I	II	III, IV
Максимум струму I , кА	200	150	100
Тривалість фронту T_1 , мкс	10	10	10
Час напівспаду T_2 , мкс	350	350	350
Заряд в імпульсі $Q_{\text{сум}}$, Кл	100	75	50
Питома енергії в імпульсі W/R , МДж/Ом	10	5,6	2,5

Таблиця 6.2 Параметри наступного імпульсу струму блискавки

Параметр струму	РБЗ		
	I	II	III, IV
Максимум струму I , кА	50	37,5	25
Тривалість фронту T_1 , мкс	0,25	0,25	0,25
Час напівспаду T_2 , мкс	100	100	100
Середня крутість a , кА/мкс	200	150	100

Таблиця 6.3 Мінімальні параметри струму блискавки і радіуси фіктивної сфери для прийнятих РБЗ.

Показник	РБЗ			
	I	II	III	IV
Мінімальний струм I , кА	3	5	10	16
Радіус фіктивної сфери R , м	20	30	45	60

Таблиця 6.4 Матеріал і мінімальні перерізи елементів зовнішньої системи блискавкозахисту

Рівень захисту	Матеріал	Переріз, мм ²		
		блискавкоприймача	струмовідводу	заземлювача
I-IV	Сталь	50	50	100
I-IV	Алюміній	70	25	Не застосовується
I-IV	Мідь	35	16	50

Примітка. Вказані значення можуть бути збільшені в залежності від підвищеної корозії або механічних дій.

Надійність захисту від ПРБ (P_3) для різних РБЗ рекомендовано приймати:

- 0,99 ÷ 0,999 – для об'єктів I РБЗ ;
- 0,95 ÷ 0,99 – для об'єктів II РБЗ ;
- 0,9 ÷ 0,95 – для об'єктів III РБЗ ;
- не нижче ніж 0,85 – для об'єктів IV РБЗ.

Захист об'єктів забезпечують блискавковідводами різних типів: одним стрижневим, одним тросовим, подвійним стрижневим, подвійним тросовим, замкненим тросовим або їхніми комбінаціями. Блискавковідводи можуть бути природними та штучними. Необхідні розміри блискавковідводів можна вибирати, користуючись формулами та методами визначення зон захисту блискавковідводів, які відповідають певному заданому значенню P_3 .

У разі проектування блискавкозахисту для звичайного об'єкта, допускається визначення зон захисту блискавковідводів за захисним кутом або методом фіктивної сфери. Для об'єктів висотою до 60 м в стандарті наводяться рекомендації щодо визначення зон захисту за методами захисного кута, фіктивної сфери і захисної сітки. Доцільно використовувати ці методи в наступних випадках:

- метод захисного кута - для простих за формою споруд і об'єктів IV РБЗ або для маленьких частин великих споруд;
- метод фіктивної сфери - для споруд складної форми;
- застосування захисної сітки доцільно в загальному випадку і особливо для захисту поверхонь.

В табл. 6.5 для рівнів захисту I–IV наводяться значення кутів при вершині зони захисту, радіуси фіктивної сфери, а також максимальний гранично допустимий крок чарунки сітки.

Таблиця 6.5 Параметри для розрахунку зон захисту блискавкоприймачів методами захисного кута, фіктивної сфери і захисної сітки

Рівень захисту	Радіус фіктивної сфери R , м	Кут α^0 , при вершині блискавковідводу для будівель різної висоти $h_{об}$, м				Крок чарунки сітки, м
		20	30	45	60	
I	20	25	*	*	*	5
II	30	35	25	*	*	10
III	45	45	35	25	*	10
IV	60	55	45	35	25	20

* В цих випадках можна застосувати лише методи сітки або фіктивної сфери.

При застосуванні методу захисного кута стрижневі блискавкоприймачі, щогли і троси розміщують так, щоб всі частини споруди знаходилися в зоні захисту, утвореній під кутом α до вертикалі. Метод захисного кута не використовують, якщо $h_{об}$ більша, ніж радіус фіктивної сфери, визначений за табл. 6.5 для відповідного рівня захисту.

Метод фіктивної сфери використовують для визначення зони захисту блискавковідводів частини або ділянок споруди, коли згідно з табл. 6.5 виключено визначення зони захисту за захисним кутом. Об'єкт вважається захищеним, якщо фіктивна сфера, торкаючись поверхні блискавковідводу і

площини, на якій той встановлений, не має спільних точок з об'єктом, що захищають.

Оди́нарний стрижне́вий блискавко́відві́д

Згідно з [1], зона захисту одинарного стрижневого блискавковідводу з висотою h являє собою круговий конус (рис. 6-2), вершина якого знаходиться на висоті $h_0 < h$. На рівні землі зона захисту утворює коло радіусом r_0 . Горизонтальний переріз зони захисту на висоті споруди, яку захищають, представляє собою коло радіусом r_x .

Зони захисту одинарних стрижневих блискавковідводів з висотою $h \leq 150$ м мають такі габаритні розміри:

$$\text{Зона А: } h_0 = 0.85h; r_0 = (1.1 - 0.002h); r_x = (1.1 - 0.002h)(h - h_x / 0.85) \quad (6.5)$$

$$\text{Зона Б: } h_0 = 0.92h; r_0 = 1.5h; r_x = 1.5(h - h_x / 0.92) \quad (6.6)$$

Зона А, орієнтовно, відповідає надійності захисту 99,5%, а зона Б – 95%.

Наприклад, для зони Б висота одинарного стрижневого блискавковідводу за відомими значеннями h_x та r_x може бути визначена за допомогою формули $h = (r_x + 1,63 h_x) / 1,5$.

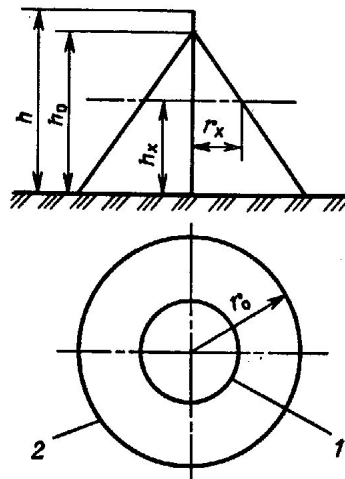


Рис. 6.2 Зона захисту одинарного стрижневого блискавковідводу [1, 4]:

1 – границя зони захисту на рівні h_x ;

2 – те саме на рівні землі

Зони захисту одинарних стрижневих блискавковідводів з висотою $150 < h < 600$ м мають такі габаритні розміри:

Зона А:

$$h_0 = [0.85 - 1.7 \cdot 10^{-3}(h - 150)]h$$

$$r_0 = [0.8 - 1.8 \cdot 10^{-3}(h - 150)]h \quad (6.7)$$

$$r_x = [0.8 - 1.8 \cdot 10^{-3}(h - 150)]h \left\{ 1 - \frac{h_x}{[0.85 - 1.7 \cdot 10^{-3}(h - 150)]h} \right\}.$$

Зона Б:

$$h_0 = [0.92 - 0.8 \cdot 10^{-3}(h - 150)]h$$

$$r_0 = 225 \text{ м} \quad (6.8)$$

$$r_x = 225 - \frac{225h_x}{[0.92 - 0.8 \cdot 10^{-3}(h - 150)]h}.$$

Згідно з [4] (Додаток В), стандартною зоною захисту одиничного стрижневого блискавковідводу висотою h є круговий конус висотою $h_0 < h$, вершина якого співпадає з вертикальною віссю блискавковідводу, рис. 6.2. Габарити зони визначаються двома параметрами: висотою конуса h_0 і радіусом конуса на рівні землі r_0 . Наведені нижче розрахункові формули (табл. 6.6) придатні для блискавковідводів висотою до 150 м. При більш високих блискавковідводах слід користуватися спеціальною методикою розрахунку.

Таблиця 6.6 Розрахунок зони захисту одиничного стрижневого блискавковідводу за [4]

Надійність захисту P_3	Висота блискавковідводу h , м	Висота конусу h_0 , м	Радіус конусу r_0 , м
0,9	від 0 до 100	$0,85h$	$1,2h$
	від 100 до 150	$0,85h$	$[1,2 - 10^{-3}(h - 100)]h$
0,99	від 0 до 30	$0,8h$	$0,8h$
	від 30 до 100	$0,8h$	$[0,8 - 1,43 \cdot 10^{-3}(h - 30)]h$
	від 100 до 150	$[0,8 - 10^{-3}(h - 100)]h$	$0,7h$
0,999	від 0 до 30	$0,7h$	$0,6h$
	від 30 до 100	$[0,7 - 7,14 \cdot 10^{-4}(h - 30)]h$	$[0,6 - 1,43 \cdot 10^{-3}(h - 30)]h$
	від 100 до 150	$[0,65 - 10^{-3}(h - 100)]h$	$[0,5 - 2 \cdot 10^{-3}(h - 100)]h$

Для зони захисту необхідної надійності одиничного стрижневого блискавковідводу радіус горизонтального перерізу r_x на висоті h_x визначається за формулою:

$$r_x = \frac{r_0(h_0 - h_x)}{h_0} \quad (6.9)$$

Два стрижневих блискавковідводи

Згідно [1], зона захисту подвійного стрижневого блискавковідводу з висотою $h \leq 150$ м показана на рис. 6.3 (рис. ПЗ.2 в [1]).

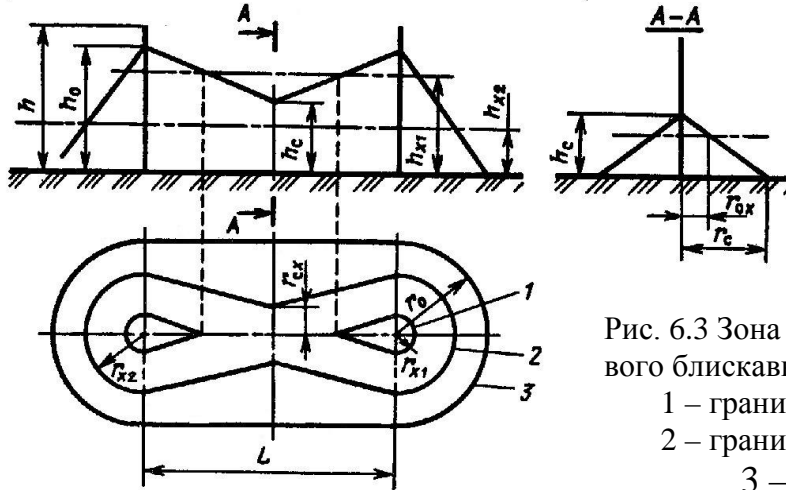


Рис. 6.3 Зона захисту подвійного стрижневого блискавковідводу [1]:

- 1 – границя зони захисту на рівні h_{x1} ;
- 2 – границя зони захисту на рівні h_{x2} ;
- 3 – те саме на рівні землі

Торцеві ділянки зони захисту визначають як зони одинарних стрижневих блискавковідводів, габаритні розміри яких h_0 , r_0 , r_{x1} , r_{x2} визначають за відповідними формулами для одинарних стрижневих блискавковідводів для обох типів зон захисту (див. формули (6.5) та (6.6) вище).

Внутрішні ділянки зони захисту подвійного стрижневого блискавковідводу мають наступні габаритні розміри.

Зона А:

при $L \leq h$:

$$h_c = h_0; \quad r_{cx} = r_x \quad r_c = r_0; \quad (6.10)$$

при $h < L \leq 2h$:

$$h_c = h_0 - (0.17 + 3 \cdot 10^{-4} h)(L - h);$$

$$r_c = r_0; \quad r_{cx} = r_0(h_c - h_x) / h_c; \quad (6.11)$$

при $2h < L \leq 4h$:

$$h_c = h_0 - (0.17 + 3 \cdot 10^{-4} h)(L - h);$$

$$r_c = r_0 \left[1 - \frac{0.2(L - 2h)}{h} \right]; \quad (6.12)$$

$$r_{cx} = r_c(h_c - h_x) / h_c.$$

У випадку відстані між стрижневими блискавковідводами $L > 4h$ для побудови зони типу А блискавковідводи слід розглядати як одинарні.

Зона Б:

при $L \leq h$:

$$h_c = h_0; r_{cx} = r_x; r_c = r_0; \quad (6.13)$$

при $h < L \leq 6h$:

$$h_c = h_0 - 0.14(L - h); r_c = r_0; r_{cx} = r_0(h_c - h_x)/h_c. \quad (6.14)$$

У випадку відстані між стрижневими блискавковідводами $L > 6h$ для побудови зони типу Б блискавковідводи слід розглядати як одинарні.

Коли є відомими значення h_c та L (при $r_{cx} = 0$), висоту блискавковідводу для зони Б визначають за формулою $h = (h_c + 0,14L)/1,06$.

Два стрижневих блискавковідводи різної висоти

Згідно [1], у випадку двох стрижневих блискавковідводів різної висоти h_1 та $h_2 \leq 150$ м зону захисту наведено на рис. 6-4 (рис. ПЗ.3 в [1]). Габаритні розміри торцевих ділянок зони захисту $h_{o1}, h_{o2}, r_{o1}, r_{o2}, r_{x1}, r_{x2}$ визначають за формулами для зон захисту обох типів одинарних стрижневих блискавковідводів (див. вище). Габаритні розміри внутрішньої ділянки зони захисту визначають за формулами:

$$r_c = (r_{o1} + r_{o2})/2; h_c = (h_{c1} + h_{c2})/2; r_{cx} = r_c(h_c - h_x)/h_c, \quad (6.15)$$

де значення h_{c1} та h_{c2} обчислюють за формулами для подвійного стрижневого блискавковідводу (див. вище).

Для двох блискавковідводів різної висоти побудову зони А подвійного стрижневого блискавковідводу виконують за умови $L \leq 4h_{min}$, а зони Б – коли $L \leq 6h_{min}$. Якщо відповідні відстані між блискавковідводами перевищують вказані величини, то блискавковідводи розглядають як одинарні.

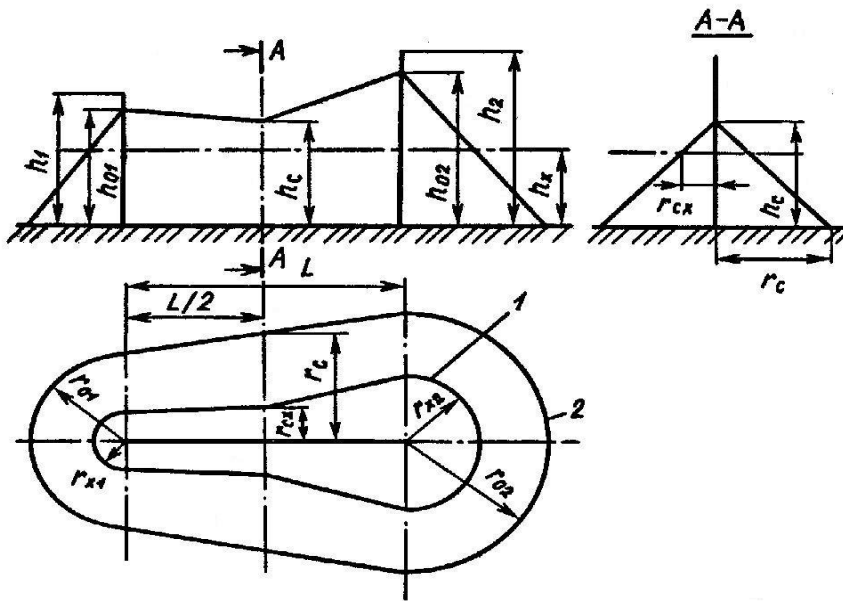


Рис. 6.4 Зона захисту двох стрижневих блискавковідводів різної висоти [1].
Позначення ті самі, що і на рис. 6-2

Згідно [4], блискавковідвід вважається подвійним, коли відстань між стрижневими блискавкоприймачами L не перевищує граничної величини L_{max} . Конфігурація вертикальних і горизонтальних перерізів стандартних зон захисту подвійного стрижневого блискавковідводу (висотою h і відстанню L між блискавковідводами) наведена на рис. 6.5 (відповідно до Додатка Д). Побудова зовнішніх областей зон подвійного блискавковідводу (напівконусів з габаритами h_0 , r_0) виконується за формулами табл. 6.6 для одиничних стрижневих блискавковідводів. Розміри внутрішніх областей визначаються параметрами h_0 і h_c , перший з яких задає максимальну висоту зони безпосередньо біля блискавковідводів, а другий — мінімальну висоту зони посередині між блискавковідводами. При відстані між блискавковідводами $L \leq L_c$ межа зони не має провисання ($h_c = h_0$). Для відстаней $L_c \leq L \leq L_{max}$ висота h_c визначається за формулою

$$h_c = \frac{L_{max} - L}{L_{max} - L_c} h_0. \quad (6.16)$$

Граничні відстані L_{max} і L_c обчислюються за емпіричними формулами табл. 6.7, які можна застосовувати для блискавковідводів висотою до 150 м. При більшій висоті блискавковідводів слід користуватися спеціальними методиками.

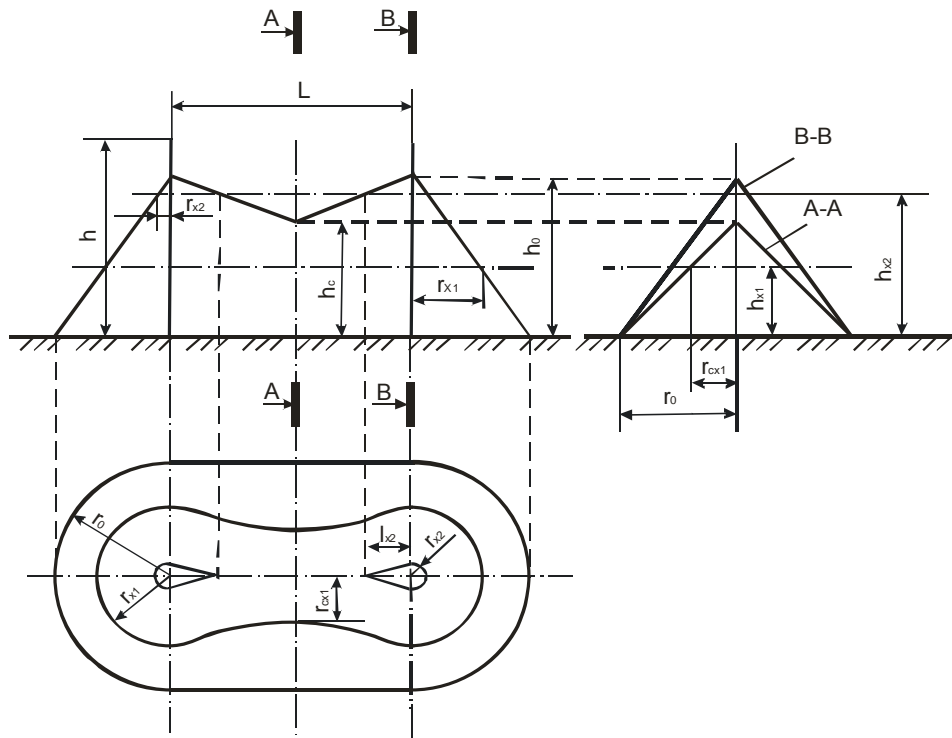


Рис. 6-5. Зона захисту подвійного стрижневого блискавковідводу [4]:

- L – відстань між блискавковідводами;
 h – висота блискавковідводу;
 h_0 – максимальна висота зони захисту безпосередньо біля блискавковідводу;
 r_0 – радіус конуса;
 r_x – максимальна напівширина зони в горизонтальному перерізі на висоті h_x ;
 h_c – мінімальна висота зони захисту посередині між блискавковідводами;
 r_{cx} – ширина горизонтального перерізу в центрі між блискавковідводами ($r_{cx} = b_x/2$).

Розміри горизонтальних перерізів зони обчислюються за наступними формулами, загальними для всіх рівнів надійності захисту:

- максимальна напівширина зони r_x в горизонтальному перетині на висоті h_x обчислюється за формулою (6-9);
- довжина горизонтального перерізу l_x на висоті $h_x \geq h_c$:

$$l_x = \frac{L(h_0 - h_x)}{2(h_0 - h_c)}, \quad (6.17)$$

при $h_x < h_c$:

$$l_x = L/2; \quad (6.18)$$

- ширина горизонтального перерізу в центрі між блискавковідводами $2r_{cx}$ на висоті $h_x \leq h_c$:

$$r_{cx} = \frac{r_0(h_c - h_x)}{h_c}. \quad (6.19)$$

Таблиця 6.7 Розрахунок параметрів зони захисту подвійного стрижневого блискавковідводу [4]

Надійність захисту P_3	Висота блискавко-відводу h , м	L_{max} , м	L_c , м
0,9	від 0 до 30	$5,75 h$	$2,5h$
	від 30 до 100	$[5,75 - 3,57 \cdot 10^{-3}(h - 30)] h$	$2,5h$
	від 100 до 150	$5,5h$	$2,5h$
0,99	від 0 до 30	$4,75h$	$2,25h$
	від 30 до 100	$[4,75 - 3,57 \cdot 10^{-3}(h - 30)] h$	$[2,25 - 0,01007(h - 30)] h$
0,999	від 100 до 150	$4,5h$	$1,5h$
	від 0 до 30	$4,25h$	$2,25h$
	від 30 до 100	$[4,25 - 3,57 \cdot 10^{-3}(h - 30)] h$	$[2,25 - 0,01007(h - 30)] h$
	від 100 до 150	$4,0h$	$1,5h$

Експериментальна установка

У якості джерела, що імітує розряд блискавки, в роботі використовується генератор імпульсних напруг (ГІН) на 500 кВ. Хоча більшість ПРБ у землю має негативну полярність, у лабораторних дослідженнях зон захисту від ПРБ застосовують грозові імпульси напруги позитивної полярності, тому що при цьому відношення довжини зустрічного лідера (рис.6.1) до відстані від первинного лідера до заземленої пластини зростає і наближається до такого, яке спостерігають в реальних умовах.

ГІН-500 (рис. 6.6) складається з чотирьох конденсаторних ступенів, кожна з яких містить по два послідовно з'єднаних конденсатори, зарядних опорів R_0 , чотирьох іскрових проміжків і зарядного устрою.

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 підключені до вихідних клем A, B зарядного пристрою паралельно через зарядні опори. В граничному випадку напруга зарядного пристрою U_{AB} досягає 125 кВ, а допустима напруга для кожного з двох конденсаторів на одному ступені становить 70 кВ.

На другому етапі внаслідок практично одночасного пробую всіх іскрових проміжків заряджені конденсатори ступенів з'єднуються послідовно, їхні зарядні напруги складаються і на виході ГІН формується однократний імпульс напругою до 500 кВ, достатньою для пробую повітряного проміжку «лідер L - земля». Додатковий опір R_d , включений у розрядне коло ГІН, служить для обмеження одночасно розрядного струму і звукового ефекту, що виникає при спрацьовуванні ГІН.

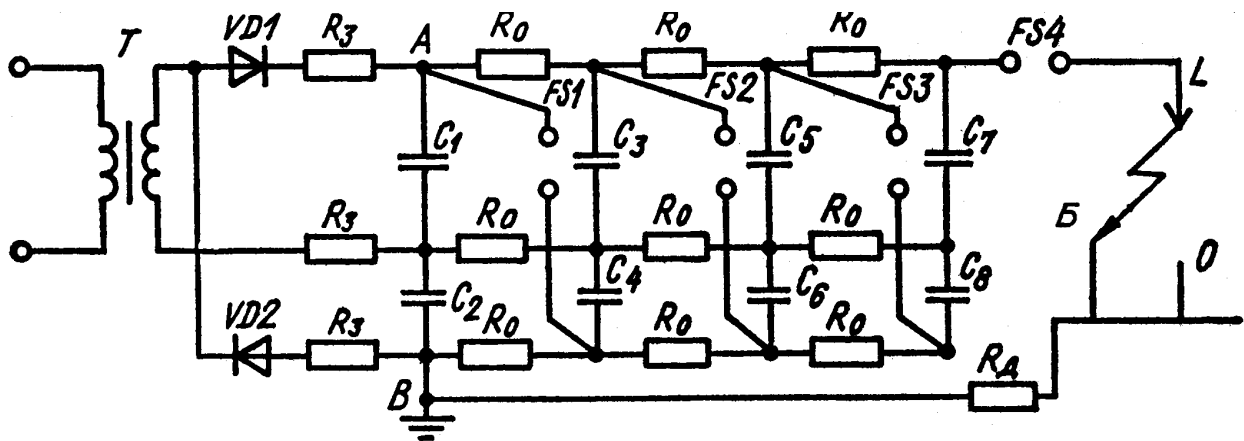


Рис. 6.6 Схема стенду для визначення захисної дії блискавковідводів

Земля моделюється металевою пластиною. На ній розташовують моделі блискавковідводів (Б) і об'єктів (О), що підлягають захисту, висота яких визначається за умовами геометричної подібності.

В якості модельних блискавковідводів та об'єктів в роботі використовують вертикальні закруглені на кінчику металеві стрижні діаметром 2 мм (на провідних підставках) з висотою: 120, 80, 60, 40 мм.

Методика виконання роботи та завдання

1. Ознайомитися з методикою роботи на високовольтному стенді і з ГІН. Визначити геометричний масштаб моделювання.
2. Ознайомитися з правилами техніки безпеки роботи на стенді.
3. Визначити зону захисту для одинарного стрижневого блискавковідводу (120 мм) із застосуванням по чергово моделей об'єктів різної висоти (80, 60, 40 мм) за десятиударною методикою або двадцятиударною методикою для ймовірності прориву блискавки на об'єкт $\psi = 10\%$. Блискавковідвід 1 (рис. 6.7) виставляють на такій відстані від точки проєкції блискавки первинного лідера (електрод L) на площину, що дев'ять з десяти грозових імпульсів ГІН призводять до ураження блискавковідводу. Потім мінімаль-

но наближають блискавковідвід (на 0,5-1 см) до проекції лідера, щоби всі 10 розрядів проходили у блискавковідвід. Далі за допомогою моделей об'єктів 2 знаходять їх розташування на границі 90% зони захисту між блискавковідводом та проекцією лідера, яке відповідає прориву одного з десяти розрядів на об'єкт. Дані розрахунків та експериментів занести в табл. 6.8.

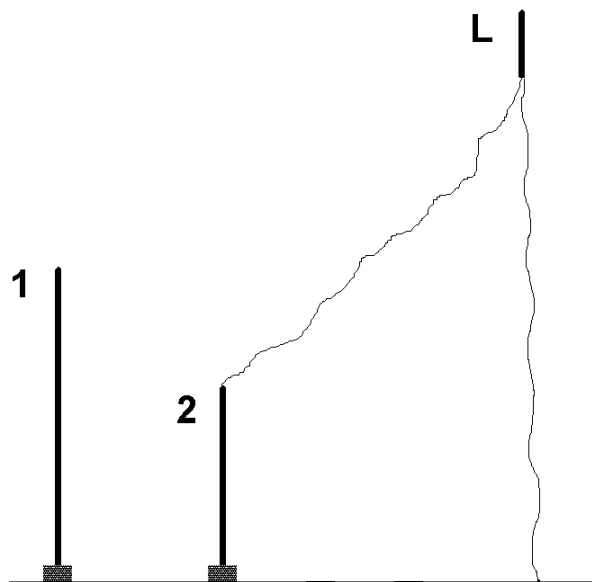


Рис. 6.7 Визначення зони захисту одинарного стрижневого блискавковідводу:

1 – блискавковідвід (Б);
2 – об'єкт (О);
L – електрод, який моделює первинний лідер

Таблиця 6.8 Визначення зони захисту одинарного стрижневого блискавковідводу

Висота об'єкта, h_x , см		8	6	4	2
Радіус r_x зони захисту, см	Розрахунок за [1]				
	Розрахунок за [4]: - формули - сфера - кут				
	Дослід				

4. Визначити зону захисту для двох блискавковідводів за умови $\psi = 10\%$. Їх розміщують симетрично відносно точки проекції лідера і зміщують разом вбік до досягнення умов уражень, описаних вище для одинарного блискавковідводу. Далі за допомогою моделей об'єктів отримати переріз зони захисту двох стрижневих блискавковідводів в площині, яка проходить посередині між ними та через точку проекції лідера. Досліди виконати щонайменше для трьох значень відстаней між двома стрижневими бли-

скавковідводами, які задовольняють умови: $L < h$; $h < L < 6h$; $L > 6h$. Дані занести в табл. 6.9.

Таблиця 6.9 Визначення зони захисту подвійного стрижневого блискавковідду
 $L = \dots$ см

Висота об'єкта h_0 , см		8	6	4	2
Півширина $b_x/2$ зони захисту, см	Розрахунок за [1]				
	Розрахунок за [4]: - формули - сфера - кут				
	Дослід				

5. Виконати розрахунки зон захисту стрижневих блискавковідводів за формулами з [1], [4] та за методами сфери і кута (коли це можливо), які викладено в [4].

6. Описати отримані результати розрахунків та модельних експериментів. Побудувати графічно зони захисту для досліджених ситуацій. Порівняти та зробити висновки.

Техніка безпеки

Роботу виконують згідно правил техніки безпеки на кафедрі техніки та електрофізики високих напруг. До роботи допускають студентів лише після проведення інструктажів з ТБ, загального та на робочому місці (під розпис). Робота на високовольтному стенді дозволяється лише під наглядом викладача. Вхід на високовольтне поле стенду – лише після спрацювання автоматичного заземлювача установки; всі операції на полі, в т.ч. по виставленню моделей блискавковідводів та об'єктів – після накладання додаткового переносного заземлювача ізолювальною штангою на вихід ГІН.

Увага: При вимиканні джерела зарядження ГІН-500 треба слідкувати, щоби пауза після останнього розряду була якомога менша. В цьому випадку чергове зарядження ГІН здійсниться до відносно невеликого рівня напруги і при примусовому заземленні ГІН захисним пристроєм протікатимуть невеликі струми розряду. При зavelикій паузі бажано дочекатися ще

одного чергового спрацювання ГІН, а тоді вимкнути джерело зарядження (живлення регулятора напруги).

Контрольні запитання

1. Як визначають зону захисту одинарного стрижневого блискавковідводу?
2. Як визначають зону захисту подвійного стрижневого та двох стрижневих блискавковідводів? Яка відстань може бути між блискавковідводами.
3. Що таке ефективна висота та активна висота блискавковідводів?
4. Поясніть принцип дії класичної системи блискавкозахисту. Чому спостерігаються прориви блискавки на об'єкт ?
5. З яких основних елементів складається стрижньовий блискавковідвід? Які основні вимоги до конструкцій блискавковідводів?
6. У чому полягає методика експериментального визначення зон захисту стрижневих блискавковідводів?
7. Від яких блискавок забезпечують захист системи з класичними блискавковідводами? Як оцінюється надійність захисту?
8. Які існують нормативні рекомендації щодо розміщення блискавковідводів на електричних підстанціях (ПС)? Прориви яких блискавок можна очікувати на ПС?
9. Які нормативні допустимі величини опорів заземлення опор лінії електропередачі, контурів станцій і підстанцій?
10. Чи припустиме приєднання заземлювачів блискавковідводів до контурів станцій і підстанцій?
11. Як відтворюють в лабораторії дію грозових імпульсів? Поясніть роботу схеми ГІН.
12. Сформулюйте основні правила техніки безпеки роботи на високовольтному стенді з ГІН?
13. Які недоліки дослідного визначення захисних зон блискавковідводів на моделях?

Додаткові запитання

1. Як визначається зона блискавкозахисту споруд за методом «радіусу сфери, що котиться»?
2. Як визначають зони захисту за «захисними кутами» (згідно МЕК)? Наведіть та охарактеризуйте залежності для куту захисту тросів ЛЕП.
3. Як захищати від блискавок високі споруди? Як розраховувати зону захисту в цьому випадку на самій споруді та поруч із нею?
4. Які особливості дії і застосування активних блискавкоприймачів?
5. Що таке висота орієнтування та радіус притягання блискавки?

6. Як впливають об'єкти, розташовані у зоні блискавкозахисту, на характеристики цієї зони?

7. Що таке «безпечна відстань» в системі зовнішнього блискавкозахисту?

8. На які характеристики системи блискавкозахисту впливає значення величини опору заземлювача блискавковідводу?

9. Як визначають зону захисту трьох блискавковідводів?

Лабораторна робота № 7

ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНИХ ПРОЦЕСІВ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Мета роботи

Дослідження імпульсних процесів в обмотках трансформаторів при набіганні грозових імпульсів, вивчення ефективності ємнісного захисту обмоток і набуття практичних навиків проведення імпульсних обмірів.

Теоретичні положення

В електричних мережах на силові високовольтні трансформатори з повітряних ліній (ПЛ) електропередачі набігають грозові імпульси напруги (Рис.7.1). При цьому між обмотками і заземленими частинами, а також між котушками обмоток виникають значні перенапруги, що визначають необхідний рівень міцності ізоляції.

Надійна робота трансформатора забезпечується, з одного боку, захистом його від хвиль, що набігають, вентильними розрядниками, обмежувачами перенапруг, створенням грозозахисного підходу і т. д., а з іншого – створенням відповідних “грозостійких” конструкцій обмоток, тобто, застосуванням спеціальних заходів внутрішнього захисту обмоток, наприклад екранних витків та ємнісних кілець, переплетених обмоток тощо.

Складність теоретичного аналізу процесів в обмотках та його наближений характер вимагають проведення експериментальних досліджень, що дозволяють

одержати повну картину імпульсних процесів і визначити, в якій мірі дана конструкція задовольняє вимогам “грозостійкості”. В зв'язку з цим кожна нова конструкція силового трансформатора в процесі розробки на моделях та після виготовлення піддається детальному експериментальному дослідженню. Такі дослідження перенапруг в обмотках трансформаторів отримали назву імпульсних обмірів.

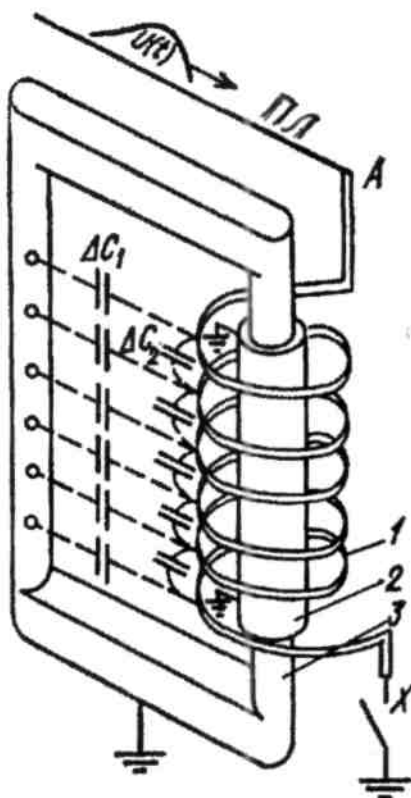


Рис.7.1 Конструкція силового трансформатора:

- 1-обмотка ВН; 2-обмотка НН;
- 3-магнітопровід.

Типовою являється конструкція трансформатора з концентричним розташуванням обмоток вищої (ВН) та нижчої (НН) напруги (рис. 1). Такий трансформатор при імпульсних впливах можна представити схемою заміщення, яка має ємність C_1 котушок відносно землі, поздовжні ємності C_2 між котушками та індуктивність L котушок (рис. 7.2, а).

При дослідженнях розподілу імпульсної перенапруги по обмотці ВН можна нехтувати опір навантаження обмотки НН, тому при імпульсних обмірах обмотку НН заземляють з обох сторін (рис.7.1).

В початковий момент часу ($t=0$) через велику крутизну фронту імпульсу індуктивності L не пропускають струму, і напруга розподіляється між ємностями C_1 та C_2 (рис.7.2, б).

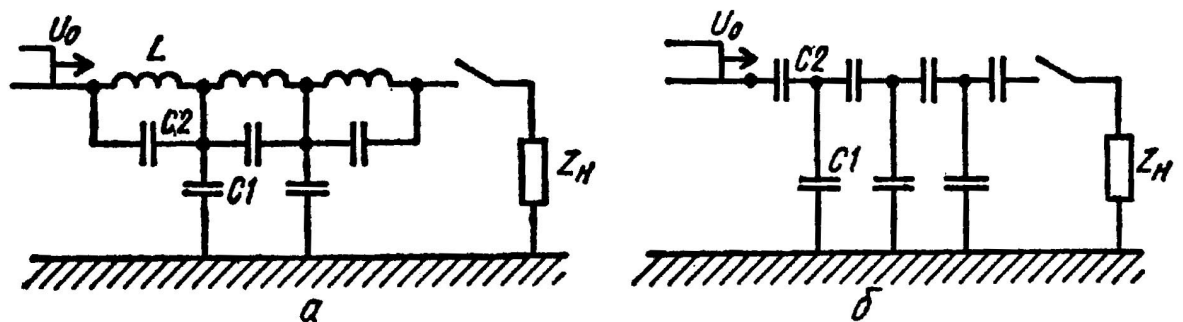


Рис.7.2 Схема заміщення обмотки трансформатора

Частина поздовжнього струму через ємність C_1 відгалужується в землю, тому незалежно від режиму нейтралі при $t=0$ потенціал $U_{\text{поч}}$ котушки буде тим меншим чим далі від вводу вона знаходиться. Початковий розподіл потенціалів обмотки з заземленою чи ізолюваною нейтраллю може бути визначений наступним виразом [6]

$$U_{\text{поч}}(x) = U_0 \exp\left(-\alpha l \cdot \frac{x}{l}\right), \quad (1)$$

де

$$\alpha l = \sqrt{\frac{C_{10Б}}{C_{20Б}}} \quad (2)$$

є параметром обмотки; $C_{10Б}$ та $C_{20Б}$ — повна поперечна та поздовжня ємності обмотки; x/l — відносне віддалення котушки від початку обмотки довжиною l . Для трансформаторів $\alpha l = 10 \dots 20$.

В усталеному режимі ($t \rightarrow \infty$) ємнісні струми дорівнюють нулю. При ізолюваній нейтралі розподіл $U_{\text{уст}}$ описується прямою, паралельною осі

абсцис (рис.7.3, а), при заземленій нейтралі напруга $U_{уст}$ рівномірно спадає від U_0 на вводі до нуля на нейтралі (рис.7.3, б).

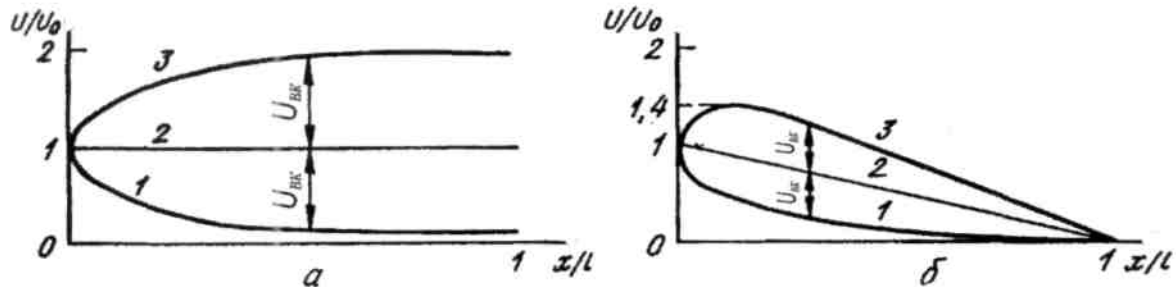


Рис.7.3 Початкові (1), усталені (2) і максимальні (3) потенціали в обмотці трансформатора при ізолюваній (а) і заземленій (б) нейтралях

Різниця початкової та усталеної напруги в кожній точці обмотки визначає амплітуду вільних коливань

$$U_{BK}(x) = U_{уст}(x) - U_{Поч}(x), \quad (3)$$

що виникають в обмотці при переході від початкового розподілу напруги до усталеного.

На відстані x від початку обмотки максимальна напруга

$$U_{МАКС}(x) \approx U_{уст}(x) + U_{BK}(x). \quad (4)$$

При ізолюваній нейтралі максимальні потенціали реалізуються в кінці обмотки і досягають значення $2U_0$, а при заземленій — у вхідній зоні і складають $(1,3 \dots 1,4) U_0$ (рис. 7.3, б).

В процесі розвитку вільних коливань на масляні канали між окремими котушками обмотки і окремі котушки діють перенапруги, які називають градієнтами.

Повний грозовий імпульс при русі вздовж обмотки згасає слабко, тому на всіх котушках градієнти досягають максимуму $(0,1 \dots 0,15) U_0$, хоча і в різний час.

Якщо в результаті пробою лінійної ізоляції на обмотку трансформатора надходить зрізаний імпульс, то градієнти на елементах вхідної зони трансформатора значно зростають і на початку обмотки досягають $0,6U_0$. В глибині обмотки градієнти різко зменшуються, бо зрізаний імпульс несе мало енергії і суттєво згладжується при русі по обмотці.

Для зменшення перенапруги в трансформаторі необхідно зменшити амплітуду вільних коливань наближенням початкового розподілу напруги

до усталеного. Цього досягають застосуванням внутрішнього захисту, котрий отримав назву ємнісного. Принцип цього захисту полягає в створенні спеціальних екрануючих ємностей C_e , через які на котушки подається струм, що компенсує стікання струму на землю через ємності C_1 . З великої

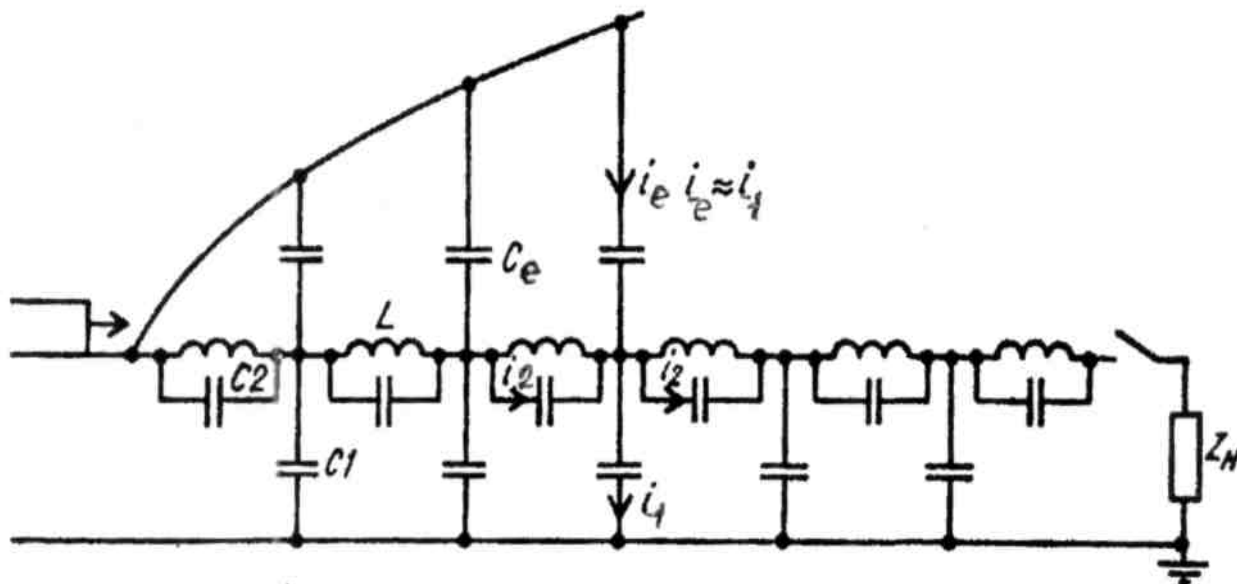


Рис. 7.4 Схема поперечного внутрішнього захисту трансформатора
Рис.4 Схема поперечного внутрішнього захисту трансформатора

кількості конструкцій такого захисту в цій роботі досліджується поперечний захист (рис. 7.4).

Експериментальна установка та методика виконання роботи.

В роботі проводиться імпульсний обмір натурних моделей обмоток силового трансформатора на 110 кВ.

Модель 1 складається зі 36 котушок, причому на обох кінцях обмотки є ємнісні кільця і гребінка з восьми екрануючих витків. На перші та останні

десять котушок накладається додаткова ізоляція, тому сумарна товщина ізоляції на дві сторони $\Delta = 6$ мм. Інші котушки мають тільки виткову ізоляцію $\Delta = 1,95$ мм (на дві сторони). Розмір всіх масляних каналів в обмотці складає 10 мм, за винятком каналу між котушками 18 та 19. Ємнісні кільця мають ізоляцію $\Delta = 14$ мм (на дві сторони), магнітопровід замінений струмопровідним циліндром. Від лінійного вводу А, нейтралі Х та всіх зо-

внiшнiх переходiв 2, 4, 6,... 34 мiж котушками виведенi вiдводи на клемну дошку.

Модель 2 вiдрiзняється вiд моделi 1 вiдсутнiстю екрануючих виткiв та додаткової iзоляцiї на котушках.

Обмiр проводиться при допомозi градиєнтографа (рис. 7.5), який включає блок синхронiзацiї на тиратронах VL1, VL2; генератор грозових iмпульсiв на тиратронi VL2 з елементами, що формують iмпульс; блок зрiзу напруги на тиратронi VL4.

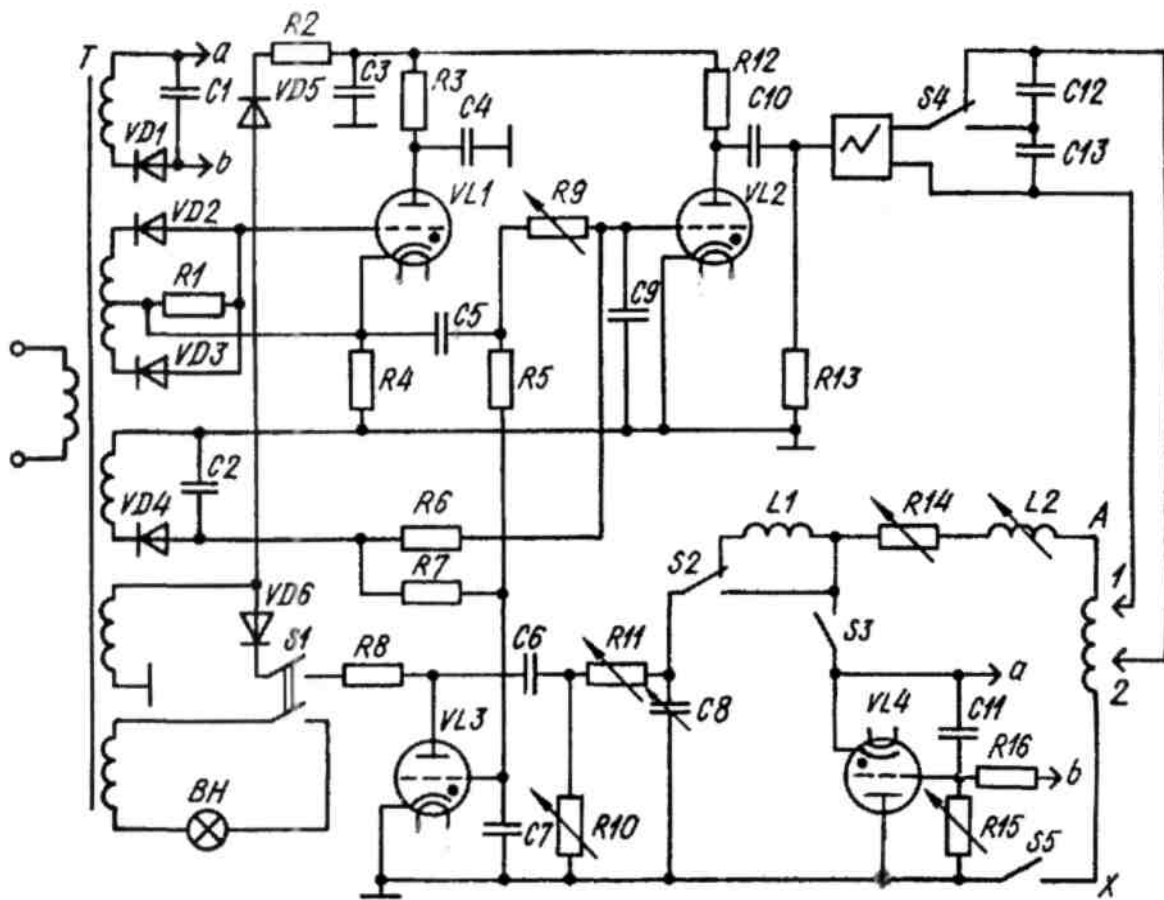


Рис.7.5 Принципова схема установки iмпульсного обмiру (А-Х – модель обмотки трансформатора)

Тиратрон VL1 закритий вiд'ємною напругою вiд двонапiвперiодного випрямляча, зiбраного на дiодах VD2 та VD3 без згладжуючого конденсатора. Конденсатор C4 заряджений. В кiнцi кожного напiвперiоду (тобто з частотою 100 Гц) напруга на сiтцi тиратрона VL1 зменшується настiльки, що вiн вiдкривається, i емкiсть C4 розряджається, видiляючи на резисторi R4 синхронiзуючий позитивний iмпульс напруги. Цей iмпульс через кон-

денсатор С5 та резистор R9 відкриває з регульованим запізненням тиратрон VL2 генератора пускових імпульсів, а через R5 – тиратрон VL3 генератора грозових імпульсів. Змінюючи опір R9 (“пуск осцилографа”), можна запустити розгортку осцилографа раніше чи пізніше моменту появи грозового імпульсу.

Ударна ємність С6 генератора грозових імпульсів заряджається через діод VD6 тільки в позитивні напівперіоди напруги живлення, тому генератор працює з частотою 50 Гц. Таким чином, кожний другий пусковий імпульс запускає ГІН. В результаті на екрані електронно-променевої трубки осцилографа з'являється крива напруги, що вимірюється, коли ГІН працює, та нульова лінія, коли ГІН закритий.

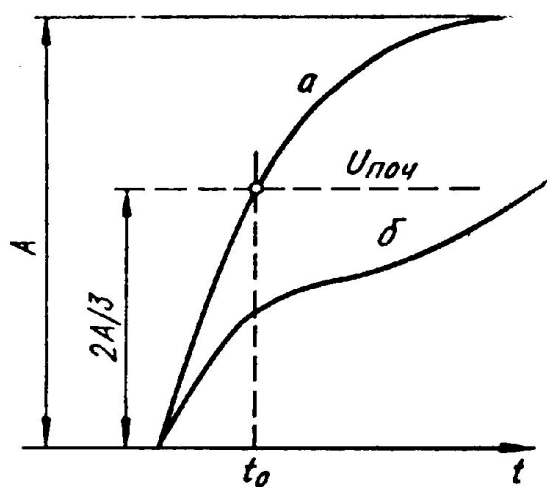


Рис.7.6 До виміру початкового розподілу напруги

Якщо вимикач S3 включений, то при появі на катоді тиратрона VL4 від'ємного грозового імпульсу ємність С11 перезаряджається через R15, а ти-

ратрон VL4 відкривається з регульованим запізненням і забезпечує зріз грозового імпульсу. Тривалість імпульсу регулюється резистором R10, тривалість фронту імпульсу залежить від опору R11 та ємності С8. За допомогою індуктивності L1 здійснюється збільшення амплітуди імпульсу при коливальній формі його спаду, резистор R14 та індуктивність L2 визначають амплітуду та частоту згасаючих коливань в петлі зрізу.

Подільник напруги, який зібраний на конденсаторах С12, С13 і включається тумблером S4, дозволяє зменшити в три рази напругу, яка подається на осцилограф N.

Вимір початкового розподілу потенціалів проводиться наступним чином. Гранично знизивши опір R1 та ємність С8, подаються на вхід (в точку А) моделі імпульси з мінімально можливою тривалістю фронту. Вимірювальний щуп 1 підключається до виводу А, а щуп 2 — до виводу Х моделі. Імпульс на екрані зміщується так, щоб вертикальна шкала екрану осцилографа проходила через його фронт на рівні 2/3 амплітуди (рис. 7.6, крива а). Момент t_0 приймається в якості початкового, а значення потенціалу в цей момент приймають за 100%. Після чого вимірюються величини потенці-

лів в той же момент на всіх котушках, для чого щуп 1 послідовно підключається в гнізда 2, 4, 6 і т. д.

При визначенні максимальних потенціалів на котушках обмотки щуп 1 також приєднується до гнізд А, 2, 4 і т. д., але вимірюється найбільше значення коливань напруги в даній точці. Імпульс, що набігає, при цьому повинен відповідати ГОСТ 1516.2- 97.

Для виміру градієнтів щупи 1 та 2 приєднуються відповідно до точок 2 і 4, 4 і 6 і т. д. Всі виміри проводяться як при ізольованій, так і при заземленій нейтралі моделі обмотки.

Завдання

1. Зібрати схему (рис. 7.5) для проведення імпульсного обміру обмоток трансформатора.

Таблиця 7.1

Номер котушки	Максимальні потенціали при повній хвилі 1,2/50				Початковий розподіл напруг			
	Заземлена		Ізольована		Заземлена		Ізольована	
	Нейтраль		нейтраль		нейтраль		нейтраль	
	мм	%	мм	%	мм	%	мм	%
А								
- 0								
4								
- 0								
8								
- 0								
...								

2. Визначити максимальні потенціали в точках А, 4, 6, ..., 32, Х при дії повного грозового імпульсу на обох моделях при заземленій та ізольованій нейтралях. Отримані результати занести в таблицю 7.1. Зафіксувати осцилограми напруги в точках А, 8, 20, 28.

3. Визначити початковий розподіл напруги на обмотках при заземленій нейтралі. Отримані дані занести в табл. 7.1.

Зафіксувати хвилю напруги та показати момент часу, що прийнятий в якості початкового для обох обмоток.

4. Побудувати криві початкового розподілу напруги та максимальних потенціалів в одній системі координат по даних п. 2 та 3. На графіках показати усталений розподіл напруги (теоретично). Розрахувати значення α для обмоток.

5. Заміряти амплітуду градієнтів на каналах А-2, 2-4, 4-6, 6-8, 8-10, 10-12, 12-14, 14-16 моделі при заземленій нейтралі та дії повного та зрізаного імпульсу напруги. Отримані результати занести в таблицю 2.

6. По результатах досліду п. 5 побудувати графік розподілу градієнтів по довжині обмотки для повної та зрізаної хвиль.

7. Скласти звіт, в якому подати всі результати роботи та зробити висновки про характер перенапруги і вплив ємнісного захисту та режиму нейтралі (заземлена, ізольована) на перенапруги в обмотці.

Таблиця 7.2

Номер між-котушечного каналу	Градієнти			
	Повний імпульс 1,2/50		Зрізаний імпульс	
	Амплітуда		Амплітуда	
	мм	%	мм	%
А – 2				
2 – 4				
...				
...				

Контрольні запитання

1. В чому полягає причина виникнення хвильових процесів в обмотках трансформатора?
2. В чому особливості схеми заміщення трансформатора, що відповідає діапазону частот грозових імпульсів?
3. Який характер має початковий розподіл потенціалів уздовж обмотки трансформатора без внутрішнього захисту? Чи сприятливий він?
4. Чим пояснюється відсутність значної відмінності в початковому розподілі напруги при заземленій та ізольованій нейтралі?
5. Чому імпульсний обмір обмотки ВН трансформатора проводиться при закорочених обмотках СН та НН? Чому імпульсний обмір моделі обмотки можливий при відсутності магнітопроводу?
6. Які явища обумовлюють виникнення хвилі градієнтів в обмотці?
7. Чому можливе відхилення експериментальної кривої максимальних потенціалів від теоретичної?
8. Які існують заходи внутрішнього захисту обмоток від грозових перенапруг?
9. В чому полягає методика імпульсного обміру обмоток трансформатора?

СТАТИСТИЧНА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Результати експериментів, записані в таблиці, необхідно опрацювати за такою методикою. Позначимо визначені пробивні напруги для кожного об'єкту або проміжку буквою A_i .

Значення пробивної напруги, отриманої при окремому досліді називають результатом спостереження A . Якщо визначити середнє значення декількох результатів спостережень, то отримане значення називають результатом вимірів \bar{A} .

Результат вимірів \bar{A} пробивної напруги дорівнює

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i, \quad (\text{Д.1})$$

де n - кількість спостережень;

A_i - результат i -го спостереження.

Точність вимірів однієї і тієї ж величини, буде тим вище, чим більша кількість спостережень. Розсіювання результатів спостережень характеризується середнім квадратичним відхиленням СКВ результатів спостережень. При обмеженій кількості спостережень, точне значення СКВ визначити неможливо. Наближення до істинного значення СКВ називають оцінкою СКВ.

Оцінка СКВ результатів спостережень знаходиться наступним чином

$$\tilde{\sigma}(A) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n U_i^2}, \quad (\text{Д.2})$$

де $U_i = A_i - \bar{A}$ - випадкове відхилення результату спостережень.

Аналогічним способом можна охарактеризувати розсіювання результатів вимірів. З цією ціллю використовують параметр - оцінка СКВ результатів вимірів:

$$\tilde{\sigma}(\bar{A}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2} \quad (\text{Д.3})$$

Оцінка СКВ результатів спостережень і оцінка СКВ результатів вимірів пов'язані співвідношенням:

$$\tilde{\sigma}(\bar{A}) = \frac{\tilde{\sigma}(A)}{\sqrt{n}} \quad (\text{Д.3})$$

Таким чином СКВ результату вимірів із зростанням кількості спостережень у групі в \sqrt{n} разів зменшується.

Оцінка СКВ результатів вимірів побічно характеризує випадкову складову похибки вимірів, проте зв'язок між $\tilde{\sigma}(\bar{A})$ і похибкою неоднозначний і залежить від числа дослідів n , а також від функції розподілення. Більш

наочною й інформативною характеристикою випадкової похибки є значення її довірчих границь. Довірчі границі випадкової похибки результату вимірів - це границі інтервалу, що накриває з заданою ймовірністю P випадкову похибку вимірів.

При нормальному законі розподілення випадкових похибок довірчі границі пов'язані з оцінкою СКВ результату вимірів співвідношенням:

$$\varepsilon = \pm t \cdot \tilde{\sigma}(\bar{A}), \quad (\text{Д.4})$$

де t - коефіцієнт Стьюдента, що залежить від кількості спостережень n і вибраної ймовірності P . Для технічних вимірів приймають $P = 0,95$ і $P=0,99$ для особливо відповідальних випадків.

Таблиця Д.1. Значення коефіцієнта t в залежності від кількості спостережень n

Кількість спостережень n	t , при		Кількість спостережень n	t , при	
	$P = 0,95$	$P = 0,99$		$P = 0,95$	$P = 0,99$
4	3,18	5,84	14	2,16	3,01
5	2,77	4,6	15	2,14	2,98
6	2,57	4,03	16	2,13	2,95
7	2,45	3,71	17	2,12	2,92
8	2,36	3,50	18	2,11	2,90
9	2,31	3,36	19	2,10	2,88
10	2,26	3,25	20	2,09	2,86
11	2,23	3,17	25	2,06	2,80
12	2,20	3,11	30	2,04	2,75
13	2,18	3,06	∞	1,96	2,58

Таким чином, при побудові графічної залежності, наприклад, пробивної напруги $U_{пр}$ від відстані між електродами L , необхідно відкласти по вісі ординат значення середньої пробивної напруги, визначеної по (Д.1) для відповідної відстані L , а поряд з кожною точкою відобразити графічно довірчі границі $\pm\varepsilon$ (див. рис.Д.1), вказавши вірогідність їх визначення P в підпису до рисунку.

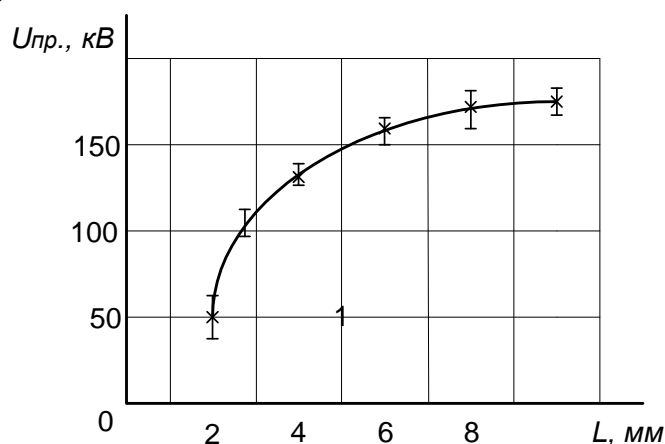


Рис.Д.1. Приклад виконання графіку пробивної напруги з урахуванням довірчих границь випадкової похибки результатів вимірів з вірогідність $P=0,95$

По результатам випробувань, у відповідності з ГОСТ 1516.2-97 [10], після визначення розрядної напруги можна також розрахувати витримувану (фактичну) напругу, тобто, найбільше значення випробної напруги, яку витримує ізоляція з заданою ймовірністю (90%).

Для цього необхідно:

- визначити нижнє значення середньої розрядної напруги об'єкту дослідження за формулою

$$U_{cp} = U_{сер} - |\varepsilon|, \quad (Д.5)$$

де $U_{сер}$ – середнє знаУ разі, коли стандартне відхилення не нормоване, то необхідно розрахувати максимальнє значення відхилення при заданій ймовірності P за виразом чення пробивної напруги, визначається за (Д.1), ε - за (Д.4);

- визначити витримувану напругу для кожного розрядного проміжку

$$U_{вит} = U_{cp}(1 - 1,3\sigma'), \quad (Д.6)$$

де σ' - найбільше значення у відносних одиницях стандартного відхилення $\sigma' = 0,03$ для зовнішньої ізоляції при короткочасному впливі змінної напруги у відповідності до [10].

$$\sigma_A^l = \tilde{\sigma}(A) \cdot \sqrt{\frac{n-1}{\chi_{(1-p/2)}^2}},$$

де функція $\sqrt{\frac{n-1}{\chi_{(1-p/2)}^2}}$ визначається згідно таблиці Д.2 у відповідності до [10].

Тоді відносне значення стандартного відхилення слід розраховувати за формулою

$$\sigma^l = \frac{\sigma_A^l}{U_{cp}}, \quad (Д.7)$$

де U_{cp} – знаходиться за Д.5.

Аналіз функцій таблиці Д.2 показує, що при незначній кількості спостережень n (наприклад, 5) значення витримуваної напруги буде суттєво заниженим. Тому при випробуваннях самовідновлювальної ізоляції кількість спостережень звичайно приймають рівною $n=15$.

Таблиця Д.2.

Кількість спостережень n	$\sqrt{\frac{n-1}{\chi_{(1-p/2)}^2}}$
5	2,87
10	1,83
15	1,58
20	1,46
30	1,34
40	1,28
50	1,25

**Розрядні напруги в кіловольтах кульових вимірювальних розрядників
при заземленні однієї з куль для нормальних атмосферних умов -
тиск $P_0 = 101,3$ кПа (1013 мбар або 760 мм рт. ст.),
температура навколишнього повітря 293 К (20°C)**

Таблиця 1

Відстань між кулями, см	Розрядні значення постійної напруги обох полярностей, амплітуди змінної напруги частотою до 400 Гц, а також розрядні значення напруг повних грозових і більш довгих імпульсів негативної полярності (50%-і розрядні напруги)											
	Діаметр куль, см											
	2	5	6,25	10	12,5	15	25	50	75	100	150	200
0,05	2,8											
0,10	4,7											
0,15	6,4											
0,20	8,0	8,0										
0,25	9,6	9,6										
0,30	11,2	11,2										
0,40	14,4	14,3	14,2									
0,50	17,4	17,4	17,2	16,8	16,8	16,8						
0,60	20,4	20,4	20,2	19,9	19,9	19,9						
0,70	23,2	23,4	23,2	23,0	23,0	23,0						
0,80	25,8	26,3	26,2	26,0	26,0	26,0						
0,90	28,3	29,2	29,1	28,9	28,9	28,9						
1,0	30,7	32,0	31,9	31,7	31,7	31,7	31,7					
1,2	(35,1)	37,6	37,5	37,4	37,4	37,4	37,4					
1,4	(38,5)	42,9	42,9	42,9	42,9	42,9	42,9					
1,5	(40,0)	45,5	45,5	45,5	45,5	45,5	45,5					
1,6		48,1	48,1	48,1	48,1	48,1	48,1					
1,8		53,0	53,5	53,5	53,5	53,5	53,5					
2,0		57,5	58,5	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0				
2,2		61,5	63,0	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5			
2,4		65,5	67,5	69,5	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0			
2,6		(69,0)	72,0	74,5	75,0	75,0	75,5	75,5	75,5			
2,8		(72,5)	76,0	79,5	80,0	80,5	81,0	81,0	81,0			
3,0		(75,5)	79,5	84,0	85,0	85,0	86,0	86,0	86,0	86,0		
3,5		(82,5)	(87,5)	95,0	97,0	98,0	99,0	99,0	99,0	99,0		
4,0		(88,5)	(95,0)	105	108	110	112	112	112	112		
4,5			(101)	115	119	122	125	125	125	125		
5,0			(107)	123	129	133	137	138	138	138	138	
5,5				(131)	138	143	149	151	151	151	151	
6,0				(138)	146	152	161	164	164	164	164	
6,5				(144)	(154)	161	173	177	177	177	177	
7,0				(150)	(161)	169	184	189	190	190	190	
7,5				(155)	(168)	177	195	202	203	203	203	
8,0					(174)	(185)	206	214	215	215	215	

Продовження Таблиці 1

9,0				(185)	(198)	226	239	240	241	241	
10				(195)	(209)	244	263	265	266	266	266
11					(219)	261	286	290	292	292	292
12					(229)	275	309	315	318	318	318
13						(289)	331	339	342	342	342
14						(302)	353	363	366	366	366
15						(314)	373	387	390	390	390
16						(326)	392	410	414	414	414
17						(337)	411	432	438	438	438
18						(347)	429	453	462	462	462
19						(357)	445	473	486	486	486
20						(366)	460	492	510	510	510
22							489	530	555	560	560
24						515	565	595	610	610	
26						(540)	600	635	655	660	
28						(565)	635	675	700	705	
30						(585)	665	710	745	750	
32						(605)	695	745	790	795	
34						(625)	725	780	835	840	
36						(640)	750	815	875	885	
55						(655)	(775)	845	915	930	
38						(670)	(800)	875	955	975	
40							(850)	945	1050	1080	
45							(895)	1010	1130	1180	
50							(935)	(1060)	1210	1260	
60							(970)	(1110)	1280	1340	
65								(1160)	1340	1410	
70								(1200)	1390	1480	
75								(1230)	1440	1540	
80									(1490)	1600	
85									(1540)	1660	
90									(1580)	1720	
100									(1660)	1840	
110									(1730)	(1940)	
120									(1800)	(2020)	
130										(2100)	
140										(2180)	
150										(2250)	

Таблиця 2

Відстань між кулями, см	Розрядні значення напруг повних грозових і більш довгих імпульсів позитивної полярності (50%-а розрядна напруга)											
	Діаметр куль, см											
	2	5	6,25	10	12,5	15	25	50	75	100	150	200
0,30	11,2	11,2		1								
0,40	14,4	14,3	14,2									
0,50	17,4	17,4	17,2	16,8	16,8	16,8						
0,60	20,4	20,4	20,2	19,9	19,9	19,9						
0,70	23,2	23,4	23,2	23,0	23,0	23,0						
0,80	25,8	26,3	26,2	26,0	26,0	26,0						
0,90	28,3	29,2	29,1	28,9	28,9	28,9						
1,0	30,7	32,0	31,9	31,7	31,7	31,7	31,7					
1,2	(35,1)	37,8	37,6	37,4	37,4	37,4	37,4					
1,4	(38,5)	43,3	43,2	42,9	42,9	42,9	42,9					
1,5	(40,0)	46,2	45,9	45,5	45,5	45,5	45,5					
1,6		49,0	48,6	48,1	48,1	48,1	48,1					
1,8		54,5	54,0	53,5	53,5	53,5	53,5					
2,0		59,5	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0			
2,2		64,0	64,0	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5			
2,4		69,0	69,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0			
2,6		(73,0)	(73,5)	75,5	75,5	75,5	75,5	75,5	75,5			
2,8		(77,0)	78,0	80,5	80,5	80,5	81,0	81,0	81,0			
3,0		(81,0)	82,0	85,5	85,5	85,5	86,0	86,0	86,0	86,0		
3,5		(90,0)	(91,5)	97,5	98,0	98,0	99,0	99,0	99,0	99,0		
4,0		(97,5)	(101)	109	110	111	112	112	112	112		
4,5			(108)	120	122	124	125	125	125	125		
5,0			(115)	130	134	136	138	138	138	138	138	
5,5				(139)	145	147	151	151	151	151	151	
6,0				(148)	155	158	163	164	164	164	164	
6,5				(156)	(164)	168	175	177	177	177	177	
7,0				(163)	(173)	178	187	189	190	190	190	
7,5				(170)	(181)	187	199	202	203	203	203	
8,0					(189)	(196)	211	214	215	215	215	
9,0					(203)	(212)	233	239	240	241	241	
10					(215)	(226)	254	263	265	266	266	266
11						(238)	273	287	290	292	292	292
12						(249)	291	311	315	318	318	318
13							(308)	334	339	342	342	342
14							(323)	357	363	366	366	366
15							(337)	380	387	390	390	390
16							(350)	402	411	414	414	414
17							(362)	422	435	438	438	438
18							(374)	442	458	462	462	462
19							(385)	461	482	486	486	486

Продовження Таблиці 2

20						(395)	480	505	510	510	510
22							510	545	555	560	560
24							540	585	600	610	610
26							570	620	645	655	660
28							(595)	660	685	700	705
30							(620)	695	725	745	750
32							(640)	725	760	790	795
34							(660)	755	795	835	840
36							(680)	785	830	880	885
38							(700)	(810)	865	925	935
40							(715)	(835)	900	965	980
45								(890)	980	1060	1090
50								(940)	1040	1150	1190
55								(985)	(1100)	1240	1290
60								(1020)	(1150)	1310	1380
65									(1200)	1380	1470
70									(1240)	1430	1550
75									(1280)	1480	1620
80										(1530)	1690
85										(1580)	1760
90										(1630)	1820
100										(1720)	1930
110										(1790)	(2030)
120										(1860)	(2120)
130											(2200)
140											(2280)
150											(2350)

Список рекомендованої літератури

1. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. РД 34.21.122-87.- М.: Энергоатомиздат, 1989.- 56 с.
2. Техника высоких напряжений. Лабораторный практикум. Под ред. М.Е. Иерусалимова. - К.: Вища школа, 1987.
3. Техніка високих напруг. За ред. В.О. Бржезицького, В.М. Михайлова/ Харків. НТУ "ХПІ". – Торнадо, 2005. – 930 с.
4. ДСТУ Б В.2.5.-38:2008. Інженерне обладнання будинків і споруд. Улаштування блискавкозахисту будівель і споруд. – К.: Мінрегіонбуд України, 2008.
5. ПУЕ:2006. Правила улаштування електроустановок. Глава 1.7 Заземлення і захисні заходи електробезпеки. Затверджені наказом МінпаливенергоУкраїни від 28.08.06 № 305.
6. Иерусалимов М.Е., Орлов Н.Н. Техника высоких напряжений. К., Издательство Киевского университета, 1967.
7. Техника высоких напряжений/под ред. Л.В. Разевига. – 2-е изд. – М., Энергия, 1976. – 488 с.
8. Техника высоких напряжений. Под ред. М.В. Костенко. М., «Высшая школа», 1973.
9. Кучинский Г.С., Кизеветер В.Е., Пинталь Ю.С. Изоляция установок высокого напряжения: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
10. ГОСТ 1516.2-97 (2003). Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытательной электрической прочности изоляции.
11. ГОСТ 1516.3-96 (2003). Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции
12. Правила улаштування електроустановок. 3-тє вид., перероб. і доп. – Х.: Вид-во «Форт», 2010. – 736 с.
13. IEC 62305-1...4 (2006). Lightning protection.
14. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах.- М.: Энергоатомиздат, 1986.

ЗМІСТ

Вступ	3
Лабораторна робота №1. Дослідження електричної міцності повітряних проміжків на змінній напрузі	6
Лабораторна робота №2. Дослідження ефекту полярності при пробі повітряних проміжків на постійній напрузі	15
Лабораторна робота №3. Дослідження імпульсної електричної міцності	24
Лабораторна робота №4. Дослідження електричної міцності вздовж поверхні твердих діелектриків	34
Лабораторна робота №5. Дослідження розподілення напруги по гірлянді ізоляторів	41
Лабораторна робота №6. Дослідження зон захисту стрижневих блискавковідводів	50
Лабораторна робота №7. Дослідження імпульсних процесів в обмотках трансформаторів.....	68
Додаток 1. Статистична обробка результатів експериментів	76
Додаток 2. Розрядні напруги (кВ) кульових вимірювальних розрядників	79
Список рекомендованої літератури	83

Навчальне видання
МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт з дисципліни
«Техніка високих напруг» (загальний курс)
для студентів спеціальностей:
«Електричні станції»,
«Електричні системи і мережі»,
«Системи управління виробництвом і розподілом електроенергії»,
«Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії»,
«Електричні машини та апарати»

Затверджено Методичною радою НТУУ «КПІ»

Укладачі: *Абрамов В.Б., Бржезицький В.О., Козюра В.М., Маслюченко І.М.,
Проценко О.Р., Хомініч В.І., Шостак В.О.*

Комп'ютерна
верстка *О.Р.Проценко*