

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА ВИСОКИХ НАПРУГ

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів, які навчаються за спеціальністю
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»,
освітньо-професійних програм «Електричні станції», «Електричні системи і
мережі», «Управління, захист та автоматизація енергосистем», «Нетрадиційні та
відновлювані джерела енергії», «Електричні машини і апарати»,
«Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2020

Техніка та електрофізика високих напруг: Лабораторний практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньо-професійних програм «Електричні станції», «Електричні системи і мережі», «Управління, захист та автоматизація енергосистем», «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії», «Електричні машини і апарати», «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.:

В. О. Шостак, О. Р. Проценко, В. Б. Абрамов, Я. О. Гаран – Електронні текстові дані (1 файл: 10,2 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 125 с.

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 3 від 05.11.2020 р.) за поданням Вченої ради Факультету електроенерготехніки та автоматики (протокол № 3 від 26.10.2020 р.)

Електронне мережне навчальне видання

ТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА ВИСОКИХ НАПРУГ ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Укладачі:	Шостак Володимир Олександрович , канд. техн. наук, доц. <i>Проценко Олександр Ростиславович</i> , канд. техн. наук, доц. <i>Абрамов Володимир Борисович</i> , канд. техн. наук, доц. <i>Гаран Ярослав Олександрович</i> , канд. техн. наук, асист.
Відповідальний редактор	<i>Троценко Є. О.</i> , канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теоретичної електротехніки
Рецензент	<i>Хоменко О. В.</i> , канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації енергосистем

Лабораторний практикум з дисципліни «Техніка та електрофізика високих напруг» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньо-професійних програм «Електричні станції», «Електричні системи і мережі», «Управління, захист та автоматизація енергосистем», «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії», «Електричні машини і апарати», «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси» призначено для поглибленого засвоєння студентами матеріалу курсу лекцій з даної дисципліни, одержання практичних навичок проведення випробувань на високовольтних установках, дослідження характеристик розрядів та компонентів високовольтної ізоляції. Лабораторний практикум розраховано на виконання на спеціалізованих високовольтних лабораторних стендах кафедри теоретичної електротехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1. ЕЛЕКТРИЧНА МІЦНІСТЬ ПОВІТРЯНИХ ПРОМІЖКІВ НА ЗМІННІЙ НАПРУЗІ.	7
2. ЕФЕКТ ПОЛЯРНОСТІ ЕЛЕКТРОДІВ ПРИ РОЗРЯДАХ У ПОВІТРЯНИХ ПРОМІЖКАХ НА ПОСТІЙНІЙ НАПРУЗІ.....	21
3. ІМПУЛЬСНА ЕЛЕКТРИЧНА МІЦНІСТЬ ПОВІТРЯНИХ ПРОМІЖКІВ (МЕТОД 50%).....	35
4. ЕЛЕКТРИЧНА МІЦНІСТЬ ВЗДОВЖ ПОВЕРХНІ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ У ПОВІТРІ	50
5. БАР'ЄРНИЙ ЕФЕКТ У ПОВІТРЯНИХ ПРОМІЖКАХ НА ВИПРЯМЛЕНІЙ ТА ЗМІННІЙ НАПРУГАХ	61
6. ЗОНИ ЗАХИСТУ СТРИЖНЕВИХ БЛИСКАВКОВІДВОДІВ	70
7. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ У ПОВІТРІ ПРИ ПОНИЖЕНОМУ ТИСКУ.....	95
ДОДАТКИ.....	116
Д1. Статистична обробка результатів експериментів	116
Д2. Розрядні напруги кульових вимірювальних розрядників	119
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ	123

ВСТУП

Метою вивчення кредитного модуля «Техніка і електрофізика високих напруг» є формування у студентів комплексу уявлень про головні процеси та закономірності, на яких базується техніка та електрофізика високих напруг. В узагальненому вигляді вони стосуються явищ, що відбуваються у речовині під впливом дії сильних електричних та магнітних полів. В лабораторному практикумі розвивається здатність проводити відповідні дослідження з використанням повномасштабних високовольтних установок. Перелік робіт наведено в змісті цього видання.

Дисципліна викладається для підготовки на бакалаврському рівні за всіма формами навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Пропоновані лабораторні роботи орієнтовані переважно на спеціалізації «Електричні станції», «Електричні системи і мережі», «Системи управління виробництвом і розподілом електроенергії», «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії» та «Електричні машини та апарати».

За результатами вивчення дисципліни очікується, що студенти будуть:

знати: базові поняття про електрофізичні процеси у речовині в результаті дії електричних та магнітних полів; закони та закономірності, які характеризують фізичні явища, що мають місце у електричних розрядах (у каналі розряду та на електродах); класифікацію типів електричних розрядів у різних середовищах та їх головні характеристики; умови появи, існування та припинення електричних розрядів; методи розрахунків їх головних характеристик; приклади використання та урахування різних типів електричних розрядів;

вміти: проводити аналіз стану діелектричного середовища в умовах дії сильних електричних полів та оцінювати характеристики головних

процесів, що мають місце у ньому; розраховувати умови виникнення електричних розрядів; експериментально отримувати електричні розряди різних типів і досліджувати головні характеристики їх та високовольтної ізоляції;

мати уявлення про: електрофізичні процеси у різних типах середовищ, що виникають під дією сильних електричних та магнітних полів; принципи побудови високовольтного обладнання, пристроїв та технологічних установок з урахуванням згаданих вище електрофізичних процесів; методи проведення випробувань та лабораторних досліджень з використанням високої напруги.

Кожна лабораторна робота є окремим цілісним експериментальним дослідженням, в результаті виконання якого вивчаються особливості електрофізичних процесів у високовольтної ізоляції та, з відповідною статистичною обробкою даних та оцінкою їх похибки (Додаток 1), визначаються основні її характеристики.

Значна увага при проведенні лабораторних робіт з техніки та електрофізики високих напруг приділяється вивченню і суворому виконанню правил техніки безпеки та технічної експлуатації високовольтного електроустаткування. Загальне ознайомлення академічної групи з цими правилами і особливостями роботи на окремих стендах проводиться перед початком лабораторних робіт, що фіксується підписами студентів та викладачів у журналах з техніки безпеки кафедри.

Обсяг виконання кожної лабораторної роботи, пов'язаної з використанням високої напруги, 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 з набором необхідного для статистичної обробки масиву даних, відповідні збирання схем, вмикання та вимикання установки, первинну обробку результатів дослідження. В лабораторному практикумі виконується не менше чотирьох робіт, які вибираються в залежності від спеціалізації.

Методичною основою при підготовці студентів до лабораторних робіт з дисципліни «Техніка та електрофізика високих напруг» є видання «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 за дисципліною із рекомендованого прикінцевого переліку. У посібнику частково використано теоретичні і експериментальні матеріали із цих джерел.

Вивчення дисципліни «Техніка та електрофізика високих напруг» та проведення її циклу лабораторних робіт є важливою частиною підготовки фахівця-електроенергетика сучасного рівня, здатного вирішувати практичні питання розробки, проектування, експлуатації та діагностики силового електроустаткування.

Укладачі висловлюють щире подяку колегам по кафедрі теоретичної електротехніки (Бржезицькому В. О., Хомінічу В. І., Соколовському С. А., Козюрі В. М., Драпею М. В. та ін.) і студентам, які сприяли розробці та розвитку відповідних стендів лабораторних робіт.

Лабораторна робота № 1

1. ЕЛЕКТРИЧНА МІЦНІСТЬ ПОВІТРЯНИХ ПРОМІЖКІВ НА ЗМІННІЙ НАПРУЗІ

з дисципліни «Техніка та електрофізика високих напруг»

(4 академічні години)

Мета роботи

Експериментальне дослідження залежностей розрядних напруг та напруженостей електричного поля у повітрі від відстаней між електродами та конфігурації електричного поля (однорідне, неоднорідне) на змінній напрузі промислової частоти.

Теоретичні відомості

Як ізоляція між проводами, проводами і опорами повітряних ліній електропередач, а також як складова зовнішньої ізоляції трансформаторів та електричних апаратів широко застосовуються повітряні проміжки. Дослідження основних закономірностей виникнення електричних розрядів у повітрі та врахування впливів різноманітних факторів на електричну міцність повітряних проміжків дозволяють визначити характеристики електричної міцності ізоляції, необхідні для проектування високовольтного обладнання і високовольтних конструкцій.

Пояснення явища повного (наскрізного) розряду між електродами в газах базуються на фізичних уявленнях про створення і розвиток електронних лавин у процесі іонізації електронами атомів чи молекул газу в електричному полі. Один з механізмів розвитку лавин – так звана *ударна іонізація*. Інтенсивність процесу такої іонізації описується коефіцієнтом ударної іонізації α , який характеризує число іонізацій, що здійснюється одним електроном на одиничному шляху його траєкторії під дією

електричного поля. Цей коефіцієнт, який ще називають першим коефіцієнтом іонізації, або коефіцієнтом Таунсенда, залежить від роду та тиску газу і напруженості електричного поля.

У повітрі, як і у інших електронегативних газах, основним процесом, який в певній мірі перешкоджає розвитку ударної іонізації, є *прилипання* електронів до нейтральних молекул, внаслідок чого утворюються негативні іони. Характеристикою цього процесу є коефіцієнт прилипання η , який визначається на підставі експериментальних даних та залежить від хімічного складу газу і відношення E/p , тобто напруженості електричного поля (E) до тиску цього газу (p).

Втрата електронів в електронегативних газах враховується для процесів розвитку ударної іонізації в таких газах за допомогою *ефективного коефіцієнта ударної іонізації*, що визначається як

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

Для виникнення електричного розряду в газі необхідно, щоб у міжелектродному проміжку в результаті дії природних (зовнішніх) або штучних іонізаторів з'явився хоча б один вільний електрон, який може дати початок утворенню лавини електронів. Якщо під час руху у сильному електричному полі цей електрон отримає достатню енергію, тоді зіткнення його з нейтральної частинкою (атомом, молекулою) може призвести до її ударної іонізації, після чого в проміжку між електродами будуть знаходитись вже два вільних електрона, кожен з яких потенційно може провести нові акти іонізації з утворенням, у подальшому, первинної (початкової) лавини електронів. У міжелектродному проміжку відбувається розряд. Вказаний перший електрон іноді називають «первинним запальним» або «першим ефективним» електроном. Кількість електронів у лавині, яка розвивається у неоднорідному електричному полі за певного тиску газу, визначається за виразом

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

де x – відстань, на яку розвивається лавина у проміжку під дією електричного поля. Якщо «первинних запальних» електронів більше одного, наприклад n_0 , тоді кількість електронів у лавині буде

$$n = n_0 \exp \left[\int_0^x \alpha_{ef} (E) dx \right]. \quad (1.3.1)$$

У випадку однорідного електричного поля відповідні вирази спрощуються і не містять інтегралів. Наприклад, (1.3.1) можна звести до

$$n = n_0 \exp(\alpha_{ef} L), \quad (1.3.2)$$

де L – відстань між електродами.

Розвиток 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, які здатні породжувати вторинні лавини у проміжку. Розряд, що виникає, за певних умов, може далі підтримуватись *самостійно*, тобто без участі зовнішніх іонізаторів. Зокрема, це може бути, наприклад, якщо первинна лавина розпочалася з одного запального електрону, а позитивні іони та випромінювання від неї будуть спричиняти появу не менше одного нового («вторинного запального») електрона, який, у свою чергу, буде створювати нову лавину з неменшим числом електронів. Таким чином, у випадку однорідного електричного поля, умову *самостійності розряду (УСР)* за лавинним механізмом можна записати у вигляді

$$\gamma[(\exp(\alpha_{ef} L) - 1)] \geq 1, \quad (1.4)$$

де γ – узагальнений коефіцієнт вторинної іонізації, що враховує утворення електронів щонайменше за трьома механізмами: (1) емісією їх під дією бомбардування катода позитивними іонами, (2) в результаті фотоемісії електронів з поверхні катода та (3) актив фотоіонізації молекул/атомів газу

у міжелектродному проміжку (внаслідок дії фотонів випромінювання з лавин); $\alpha_{\text{еф}}L$ – загальна кількість ефективних іонізацій, що проведені «первинним запальним» електроном на шляху між електродами; $\exp(\alpha_{\text{еф}}L)$ та $[(\exp(\alpha_{\text{еф}}L) - 1)]$ – відповідно, кількість електронів та кількість позитивних іонів, що будуть міститись у лавині після того, як вона перетне увесь проміжок L між електродами. Якщо прилипання електронів відсутнє, тоді $\eta = 0$ і $\alpha_{\text{еф}} = \alpha$. Але для розвитку розряду α має бути більшим за η .

Значення напруги, за якої у міжелектродному проміжку виконується умова самостійності розряду, називається початковою напругою U_0 . Напруженість електричного поля, за якої у вказаному проміжку забезпечуються УСР, називається початковою напруженістю електричного поля (E_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 відрізнитись від напруженості (напруженостей) інших його зон. Залежно від розподілення вказаної напруженості електричні поля прийнято розділяти на *однорідні* (напруженість в усьому міжелектродному проміжку однакова) та *неоднорідні* (напруженість – різна). Це означає, що необхідне для УСР значення E_0 може бути наявним в усіх точках міжелектродного проміжку або ж лише в якійсь із його зон.

Наприклад, однорідне поле створюється електродами, що являють собою дві паралельні площини з плоскими поверхнями нескінченної площі. Кривизна ж 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 L , меншій ніж їхній радіус чи діаметр D ($L < 0,5D$), 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 з радіусами R (більший циліндр) та r (менший циліндр): за умови, коли $R \gg r$, поле буде *різконеоднорідним*, а за умови, коли $1 < R/r < e$ ($e = 2.718$ – основа натурального лагарифму), поле буде квазіоднорідним. Показовим прикладом неоднорідного поля є таке, що створюється парою електродів «стрижень - 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 цього поля, ніж в усіх інших зонах проміжку. Це призводить до появи в цій зоні одного із видів самостійного розряду – *корони*. В різконеоднорідних полях початкова напруга відповідає напрузі виникнення корони, а для міжелектродних проміжків з однорідним (квазіоднорідним) полем досягнення початкової напруги призводить одразу до повного (наскрізного) розряду у цих проміжках. Напруга, за якої відбувається повний розряд, називають пробивною напругою ($U_{\text{проб}}$).

Початкові (U_o) та пробивні ($U_{\text{проб}}$) напруги для найпростіших геометричних форм електродів можливо визначити з емпіричних виразів. В наведених далі виразах амплітудні значення цих напруг визначено у кіловольтах. Формули стосуються проміжків з довжиною від одиниць до десятків сантиметрів та в умовах тиску, який не дуже сильно відрізняється від нормального.

Паралельні пласкі електроди:

$$U_o = 24,5\delta L + 6,4\sqrt{\delta L}, \quad (1.5)$$

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 (1.5) значення будуть відповідати як початковим, так і пробивним наругам, одночасно ($U_o=U_{\text{проб}}$).

Сфера – сфера:

$$U_o = \frac{1}{f} 27,2\delta(1 + 0,54/\sqrt{r\delta})L, \quad (1.6)$$

де f – геометричний фактор; r – радіус сфер, см; δ і L – те саме, що для (1.5).

За умови заземлення однієї із сфер, значення f визначається за табл. 1.1.

Таблиця 1.1. Значення параметру f в залежності від співвідношення L/r

L/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 (1.6) дає значення пробивної напруги проміжку, а при $L/r > 2$ – напругу початку корони.

Коаксіальні циліндри:

$$U_o = 24,5\delta \left[1 + 0,65(\delta \cdot r_o)^{-0,38} \right] r_o \ln \frac{R}{r_o}, \quad (1.7)$$

де r_o , R – відповідно радіуси внутрішнього та зовнішнього циліндрів, см; δ – те саме, що для (1.5).

Формула (1.7) дає значення пробивної напруги проміжку при $R/r_o < 2,7$ і початкової напруги – при $R/r_o > 2,7$. Аналіз виразу (1.7) вказує, що функція зміни U_o від r_o та R має екстремум при $R/r_o \sim 2,7$.

Стрижень – площина (заземлена):

$$U_{\text{проб}} = 16,9\delta L^{0,76}, \quad (1.8)$$

де δ і L – те саме, що для (1.5).

Емпірична формула (1.8) дозволяє визначити значення пробивної напруги $U_{проб}$ проміжку, утвореному парою електродів «стрижень – площа», для відстаней L від 2 см до 8 см.

Стосовно проміжку з електродами «стрижень-площина» 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 з електродами «стрижень – площа» будуть меншими, ніж для проміжків з електродами «стрижень – стрижень», в т.ч. коли один із стрижнів - заземлений. Таке твердження є справедливим для випадків коли довжина заземленого стрижня l_3 і відстань L проміжків з електродами «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 заземлених стрижень предметів, а отже до збільшення напруженості електричного поля біля незаземленого стрижня, що може відчутно впливати на зменшення пробивної напруги проміжку з електродами «стрижень-стрижень» в цілому. Тому пробивна напруга проміжку з електродами «стрижень-стрижень» у порівнянні з пробивною напругою проміжку з електродами «стрижень – площа» (за інших однакових умов) може їй дорівнювати, бути трохи більшою чи меншою. У випадку симетричного включення електродів «стрижень-стрижень», для оцінки пробивної напруги такого проміжку можна врахувати формулу (1.8) та дещо модернізувати її з урахуванням геометрії двох електродних систем.

На величину пробивної напруги, крім густини повітря, впливає також його вологість. 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 негативно заряджені молекули. На практиці часто використовують поправкові коефіцієнти, що враховують впливи густини та вологості повітря, які дещо відрізняються для різних систем електродів та виду прикладеної напруги.

Коли необхідно виконувати порівняння результатів ряду експериментів з визначення пробивних напруг, тоді всі отримані експериментальні значення $U_{\text{проб}}$ доцільно приводити до нормальних умов довкілля: 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

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

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

Стенд для проведення досліджень і методика виконання роботи

Стенд для проведення досліджень електричної міцності повітряних проміжків складається з двох частин, розмежованих сітчастою огорожею. На одній частині (низьковольтній – місці роботи оператора) розташовано пульт керування, що дозволяє подавати, регулювати і вимірювати значення високої напруги, яка подається на повітряні проміжки між електродами різної конфігурації з метою визначення електричної міцності цих проміжків, а також дистанційно регулювати відстані між зазначеними електродами. На другій (високовольтній) – джерело високої напруги, захисний резистор та конструктивні елементи, що дозволяють

встановлювати і переміщувати електроди досліджуваних повітряних проміжків.

Принципова схема стенду для досліджень наведена на рис.1.1.

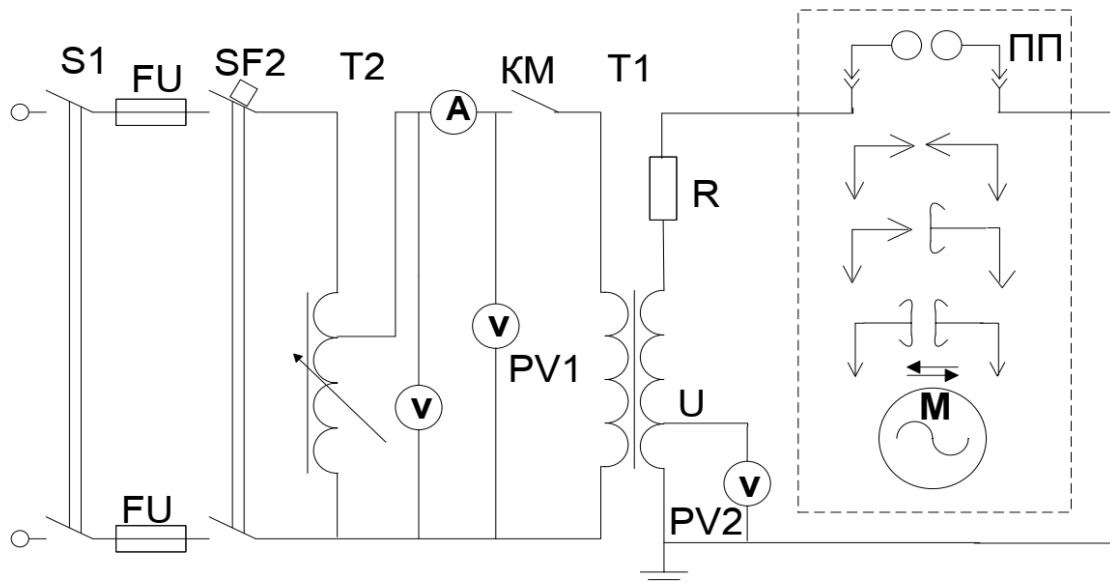


Рис. 1.1. Принципова схема стенду для досліджень:

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 A і вольтметр V, які є щитовими, мають низький клас точності і які під час вимірювань не застосовуються); U – спеціальна обмотка для вимірювання високої напруги трансформатора T1 (не у всіх трансформаторів наявна); ПП – досліджувані повітряні проміжки; M – електродвигун для регулювання відстаней між електродами

ПП

Джерелом високої напруги є випробувальний трансформатор *T1* типу ИОМ-100/25. На даному стенді цей випробувальний трансформатор не має спеціальної обмотки для вимірювання високої напруги, тому вказана напруга вимірюється за показаннями вольтметра *PV1* з урахуванням коефіцієнта трансформації трансформатора *T1* (100000/350). Слід пам'ятати, що наявним вольтметром *PV1* вимірюють діючі значення напруг. Для отримання амплітудних значень, які, власне, і відповідають

пробивним напругам, що визначаються в процесі експериментів, показання вольтметра *PV1* слід помножити на $\sqrt{2}$.

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

Вмикання установки виконується за допомогою рубильника *SI*, в якому забезпечено візуальне спостереження за положенням його контактів, 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 та у випадку нерозміщення штанги ручного заземлювача на додатковий кінцевий вимикач над дверима.

Виконання будь-яких робіт на високовольтній частині установки можливе лише після повного відключення установки рубильником *SI* і накладення переносного заземлювача на високовольтний вивід трансформатора *T1*. Двері сітчастої огорожі стенду на весь час знаходження людини на його високовольтній частині повинні бути відчиненими.

Резистор *R* призначено для обмеження струмових перевантажень трансформатора *T1* у випадках виникнення повного (наскрізного) розряду в повітряних міжелектродних проміжках (*III*). В момент пробою автоматичний вимикач *SF2* вимикає установку. Як згадувалося, значення пробивної напруги вимірюються за допомогою вольтметра *PV1*.

Електроди різної форми закріплюються на ізолювальних конструкціях і, після встановлення необхідної між ними відстані за шкалою, напруга випробувального трансформатора *T1* за допомогою

регулятора напруги $T2$ плавно підвищується до значень, за яких виникає повний розряд у проміжку *III*.

Для електродів певної форми при незмінній відстані між ними дослід з отриманням повного розряду в повітряному проміжку повторюють не менше п'яти разів, вимірюючи при цьому значення амплітуд напруг розряду, відповідно, U_1, U_2, U_3, U_4, U_5 , для визначення середнього значення пробивної напруги $U_{\text{проб.ср.}}$. Потім дистанційно змінюється відстань між електродами, і процедура визначення пробивної напруги повторюється. Дані вимірювань записуються, залежно від досліджуваних проміжків *III*, у табл. 1.2 та 1.3.

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 досліджуватися в даній роботі, а також з описом стенду 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.

в) Перевірити свою підготовку до заняття за переліком контрольних питань.

2. Під час проведення заняття:

а) Ознайомитись з конструктивним виконанням стенду для досліджень, розташуванням його складових частин, порядком проведення роботи, правилами безпечного виконання робіт на установці.

б) Дослідити електричну міцність повітряних проміжків на змінній напрузі промислової частоти для електродів: а) площа-площина; б) сфера-сфера; в) стрижень-площина; г) стрижень-стрижень; д) коаксіальні циліндри. Зміну відстаней між встановленими електродами певної

конфігурації виконувати згідно з даними для L , вказаними у таблиці 1.2, а для коаксіальних циліндрів – заміною внутрішнього циліндра з радіусом r_o , згідно з таблицею 1.3. Результати вимірювань $U_1 \dots U_5$ занести в таблиці 1.2 та 1.3.

в) Розрахувати для кожного досліду середнє арифметичне значення пробивної напруги $U_{\text{проб.сер.}}$, визначити середнє квадратичне відхилення вимірювань σ і величину довірчого інтервалу вимірювань ε для кожного дослідженого проміжку, використовуючи Додаток 1. Отримані дані занести у таблиці 1.2 та 1.3. Розрахувати значення середньої пробивної напруженості електричного поля проміжку $E_{\text{проб.сер.}} = U_{\text{проб.сер.}}/L$, а також витримувану напругу $U_{\text{вит.}}$ (див. Додаток 1). Отримані дані також занести до таблиць 1.2, 1.3.

3. Для досліджених проміжків, утворених електродами «площина-площина», «сфера-сфера», «стрижень-площина», «стрижень-стрижень» (перша група), побудувати отримані на підставі експериментів та розрахунків графічні залежності пробивних напруг (відповідно $U_{\text{проб.сер.}}$ та $U_{\text{розр.}}$), витримуваних напруг $U_{\text{вит.}}$ і пробивних напруженостей електричного поля $E_{\text{проб.сер.}}$ від відстаней між електродами L , а для проміжку, створеному електродами у вигляді коаксіально розташованих циліндрів – від r_o/R . З метою зручного співставлення отриманих даних, під час побудови суміщати в одній координатній сітці залежності для проміжків з різною формою електродів (перша група). Для системи електродів «коаксіальні циліндри» ці залежності побудувати на окремому графіку.

4. Проаналізувати отримані результати та залежності, порівняти з результатами подібних досліджень, описаними у джерелах, і зробити висновки.

Таблиця 1.2. Результати експериментів і розрахунків

Електроди, що утворюють повітряний проміжок	L , см	$U_{\text{проб}}, \text{кВ}$					$U_{\text{проб. сер.}}, \text{кВ}$	σ , кВ	ϵ , кВ	$E_{\text{проб сер.}}, \text{кВ/см}$	$U_{\text{розр.}}, \text{кВ}$	$U_{\text{вит.}}, \text{кВ}$
		U_1	U_2	U_3	U_4	U_5						
Площина-площина	1											
	1,5											
	2											
	2,5											
	3											
Сфера – сфера (радіус сфер $r = 49$ мм)	1											
	1,5											
	2											
	2,5											
	3											
Стрижень-площина	2											
	3											
	4											
	5											
	6											
	7											
	8											
Стрижень-стрижень	2											
	3											
	4											
	5											
	6											
	7											
	8											

Таблиця 1.3. Результати експериментів і розрахунків

Електроди, що утворюють повітряний проміжок	r_o , мм	$U_{\text{проб}}, \text{кВ}$					$U_{\text{проб. сер.}}, \text{кВ}$	σ , кВ	ϵ , кВ	$E_{\text{проб сер.}}, \text{кВ/см}$	$U_{\text{розр.}}, \text{кВ}$	$U_{\text{вит.}}, \text{кВ}$
		U_1	U_2	U_3	U_4	U_5						
Коаксіальні циліндри (внутрішній радіус зовнішнього циліндра $R = 27,5$ 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 отримані результати, у табл.1.2 та відповідні графічні залежності, у т.ч. відмінності у значеннях $U_{\text{проб.сер.}}$ та $U_{\text{розр.}}$.
8. Пояснити отримані результати, у табл.1.3 та відповідні графічні залежності, у т.ч. відмінності у значеннях $U_{\text{проб.сер.}}$ та $U_{\text{розр.}}$.

Лабораторна робота № 2

2. ЕФЕКТ ПОЛЯРНОСТІ ЕЛЕКТРОДІВ ПРИ РОЗРЯДАХ У ПОВІТРЯНИХ ПРОМІЖКАХ НА ПОСТІЙНІЙ НАПРУЗІ

з дисципліни «Техніка та електрофізика високих напруг»

(4 академічні години)

Мета роботи

Дослідження ефекту полярності електродів при розрядах у повітряних проміжках з різконеоднорідним полем за використанням генератора постійної напруги GP50/300.

Теоретичні відомості

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

У різко неоднорідних несиметричних електричних полях (електроди «стрижень-площина», «коаксіальні циліндри» при $R \gg r_0$) у разі дії постійної напруги величина початкової та пробивної напруги повітряного проміжку залежить від полярності електрода з меншим радіусом кривизни. Це явище називається *ефектом полярності*.

Наприклад, за негативної полярності електрода з малим радіусом кривизни електрична міцність всього повітряного проміжку виявляється значно більшою у порівнянні з випадком позитивної полярності цього електрода. Пояснення цього ефекту пов'язують з істотним впливом об'ємного позитивного заряду, що з'являється біля електрода з меншим

радіусом кривизни, на розподілення напруженості електричного поля в усьому проміжку.

Розглянемо більш детально спочатку випадок з електродами «стрижень-площина», коли електрод з меншим радіусом кривизни (стрижень) має *позитивну полярність* (рис. 2.1, а). Прийmemo, що в результаті природних (зовнішніх) іонізаторів в області поблизу вістря стрижня з'явився вільний електрон. За досягнення певної напруженості електричного поля (E) він спричинить виникнення початкової лавини електронів і розвиток її в напрямку до стрижня. Але, як тільки в цій області E досягне значень E_0 , (коли $E \geq E_0$ та $\alpha > \eta$) і забезпечиться умова самостійності розряду (див. лабораторну роботу № 1), тоді інтенсивне випромінювання фотонів з області поблизу голівки лавини буде викликати все нові лавини поруч та позаду першої, і поблизу вістря стрижня встановиться стабільний локальний (коронний) розряд. Оптично цей розряд у повітрі проявляється у вигляді слабкого блакитного чи бузкового світіння безпосередньо біля кінця електрода, викликаного випромінюванням фотонів.

За позитивної полярності стрижня, як згадувалося, лавини будуть розвиватись в напрямку до його вістря, тобто в напрямку області з більш високою напруженістю електричного поля. Число іонізацій та щільність позитивних іонів при цьому сильно зростають. Електрони внаслідок своєї високої рухливості швидко досягають анода (електрода з позитивною полярністю, в даному випадку – стрижня) й осаджуються на ньому, а іони, що залишаються в просторі, утворюють поблизу вістря стрижня позитивний об'ємний заряд. У результаті напруженість поля безпосередньо поблизу вістря дещо зменшується, а в просторі між об'ємним зарядом і катодом (електродом з негативною полярністю – площиною) істотно збільшується (рис. 2.1,а). При цьому ніби коротшає ізоляційна відстань зонами з зарядами протилежних знаків і за рахунок підвищеної E

створюються більш сприятливі умови для розвитку повного (наскрізного) розряду у всьому міжелектродному проміжку. Тобто розвиток такого розряду від стрижня в глибину проміжку до площини потребує напруги (U) між електродами меншої, аніж у разі відсутності позитивного об'ємного заряду.

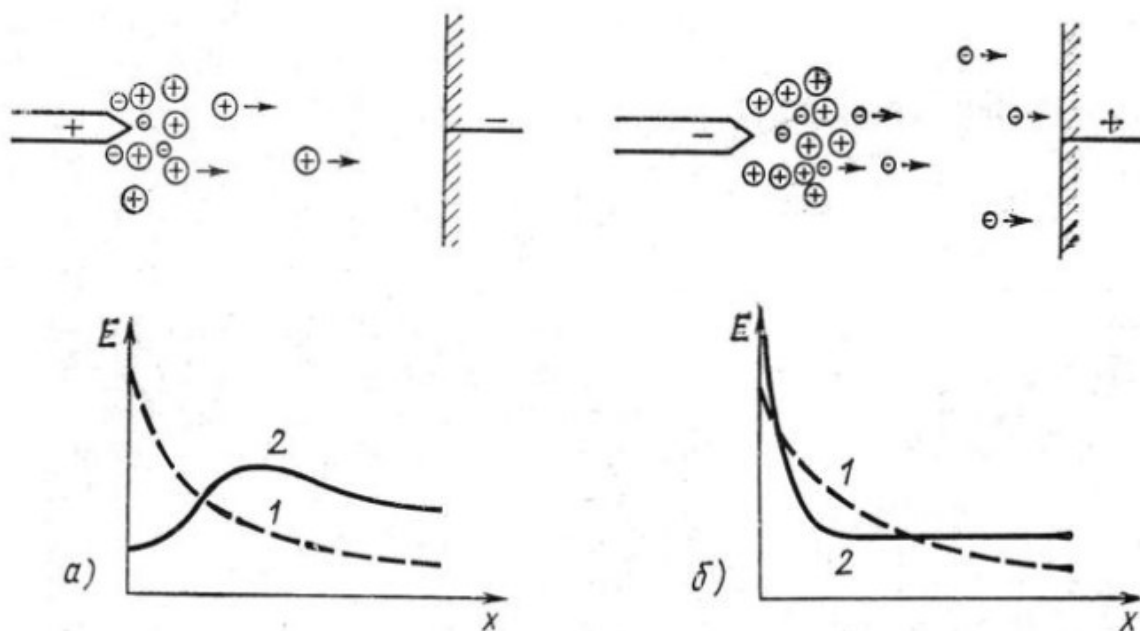


Рис. 2.1. Розподілення поля в проміжках стрижень–площина при позитивній (а) та негативній (б) полярностях напруги:
1 – без врахування об'ємного заряду; 2 – з урахуванням об'ємного заряду

У випадку *негативної полярності* стрижня вільні електрони поблизу нього можуть з'являтися не тільки через зовнішні іонізатори, але також і за рахунок емісії з катода, яким тепер є сам стрижень (рис. 2.1,б). Тут вони будуть рухатись в напрямку дії поля, що слабшає. Максимум іонізації трохи віддалений від вістря стрижня, але перебуває усе ще в області, де $E > E_0$ та $\alpha > \eta$. За таких умов, як і у випадку позитивної полярності стрижня, поблизу його вістря виникає коронний розряд, але, на відміну від попереднього, тепер електрони швидко йдуть до площини (анода) в

область слабого поля, де $E < E_0$, а позитивний об'ємний заряд, що залишається у безпосередній близькості від вістря стрижня (катода) істотно підсилює там електричне поле. У проміжку між позитивним об'ємним зарядом та анодом середня напруженість електричного поля послаблюється (рис. 2.1, б). Тобто розвиток повного розряду у всьому проміжку між електродами ускладнюється і буде вимагати напруги (U) більшої, аніж у разі відсутності позитивного об'ємного заряду. Для електронегативних газів (кисень, елегаз, повітря та ін.) характерною особливістю є утворення в глибині проміжку негативних іонів за рахунок прилипання не дуже швидких електронів до нейтральних молекул. Внаслідок цього в зоні ближче до площини електричне поле може дещо посилюватися (рис. 2.1, б). Звичайно це посилення не є достатнім для компенсації послаблення поля поблизу позитивного об'ємного заряду. Загально ж проміжки з електронегативними газами мають більшу електричну міцність у порівнянні з випадком електропозитивних газів за рахунок зменшення кількості електронів, що приймають участь розвитку лавин.

Отже, підсумуємо обидва випадки полярності. При негативній полярності стрижня величина напруженості електричного поля біля поверхні вістря стрижня збільшується за рахунок впливу позитивного об'ємного заряду іонів і зменшується в глибині проміжку до площини. Це збільшує інтенсивність корони біля вістря, але утруднює процес проростання розряду вглиб проміжку (в область слабого поля), що приводить до збільшення розрядної напруги для всього проміжку. При позитивній полярності стрижня спостерігається зворотна картина: поле біля поверхні вістря стрижня послаблюється, що знижує інтенсивність корони, а в глибині проміжку це поле підсилюється, знижуючи тим самим пробивну напругу всього проміжку.

Стенд для проведення досліджень та методика виконання роботи

Стенд для проведення досліджень виготовлено на основі генератора постійної високої напруги GP50/300 виробництва підприємства TUR (Німеччина), який дозволяє отримувати постійну напругу різної полярності із значеннями до 300 кВ при максимальному струмі навантаження 0,1 А.

Стенд для проведення досліджень складається з двох частин, розмежованих сітчастою огорожею. На одній частині (низьковольтній – місце роботи оператора) розташовано блок автоматики та пульт керування, за допомогою якого можна подавати, регулювати і вимірювати значення високої напруги, котра прикладається на досліджуваний проміжок, а також дистанційно регулювати відстані між електродами цього проміжку. На другій - високовольтній, яка є випробувальним полем, встановлені (див. рис. 2.2, 2.3): джерело високої напруги: високовольтний трансформатор TR1, високовольтні вентилі G1 та G2 й конденсатори C_1 та C_2 . На високовольтній частині розміщені також захисний обмежуючий резистор R10, високовольтний подільник напруги та конструктивні елементи, що дозволяють закріпити електроди досліджуваного іскрового проміжку та регулювати відстань між ними. Іскровий проміжок в цій роботі утворюється парою електродів «стрижень-площина». На випробувальному полі розміщено також регулятор низьковольтної напруги живлення з електроприводом.

Живлення трансформатора TR1 здійснюють від мережі 380 В, 50 Гц. Конструкція трансформатора виконана таким чином, що між мережевою (низьковольтною) обмоткою НН та високовольтною обмоткою ВН знаходиться ізоляція, розрахована на робочу постійну та змінну напругу 150 кВ. Функціональну схему трансформатора та електричну схему генератора постійної напруги у спрощеному вигляді наведено на рис. 2.2 та 2.3, відповідно.

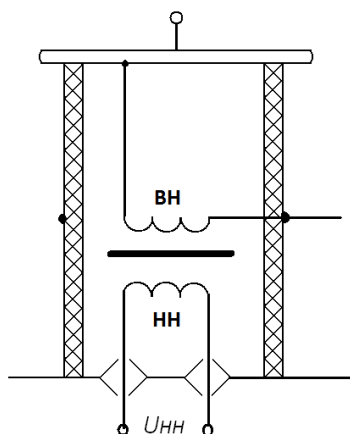


Рис. 2.2. Функціональна схема високовольтного трансформатора TR1 генератора постійної напруги GP50/300

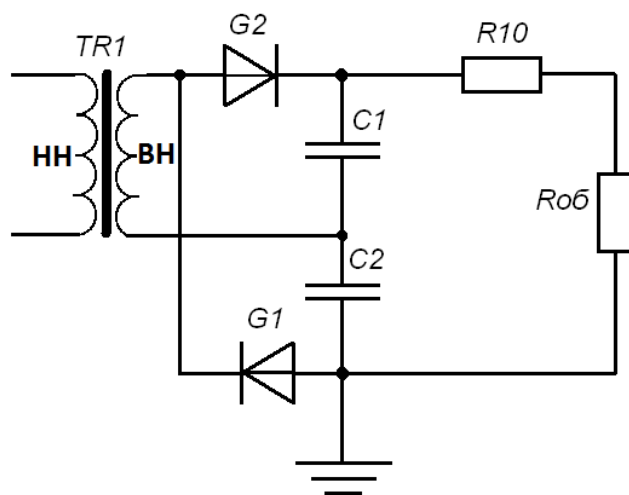


Рис. 2.3. Спрощена електрична схема генератора постійної напруги GP50/300

Змінна висока напруга з вторинної обмотки ВН трансформатора TR1 з 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 (рис. 2.3). При вказаних на рис. 2.3 полярностях вентилів високовольтні конденсатори C_1 та C_2 (номінальна ємність 144 нФ) заряджаються кожен до максимальної

напруги 150 кВ (один на позитивному, а інший на негативному півперіоді промислової частоти). На виході генератора ці напруги складаються, завдяки чому вихідна напруга генератора дорівнює 300 кВ. У разі необхідності в зміні полярності вихідної напруги потрібно змінити полярність включення вентилів G1 та G2 на протилежну. Практично це забезпечують зміною їх місцями.

Випробувальна напруга подається на об'єкт випробувань через обмежуючий резистор R_{10} , 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 омичний подільник (який включено паралельно до $R_{об}$, на рис. 2.3 не показано), котрий має коефіцієнт ділення $1/300$ та складається з високовольтного та низьковольтного плеча. Сигнал з низьковольтного плеча подається на вимірювач високої напруги, який встановлено на пульті керування генератора і має три варіанти границі вимірів – 100 кВ, 200 кВ, 400 кВ, котрі перемикаються відповідними кнопками.

Всі елементи вимірювальної схеми мають 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.

Увімкнення генератора та проведення випробувань необхідно починати після узгодження плану робіт з керівником 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 з конденсатора C_1 та встановлення його на кінцевий вимикач над вхідними дверима випробувального поля;
- зачинення дверей випробувального поля на замок.

Пульт керування лабораторного стенду представлено на рис. 2.4.

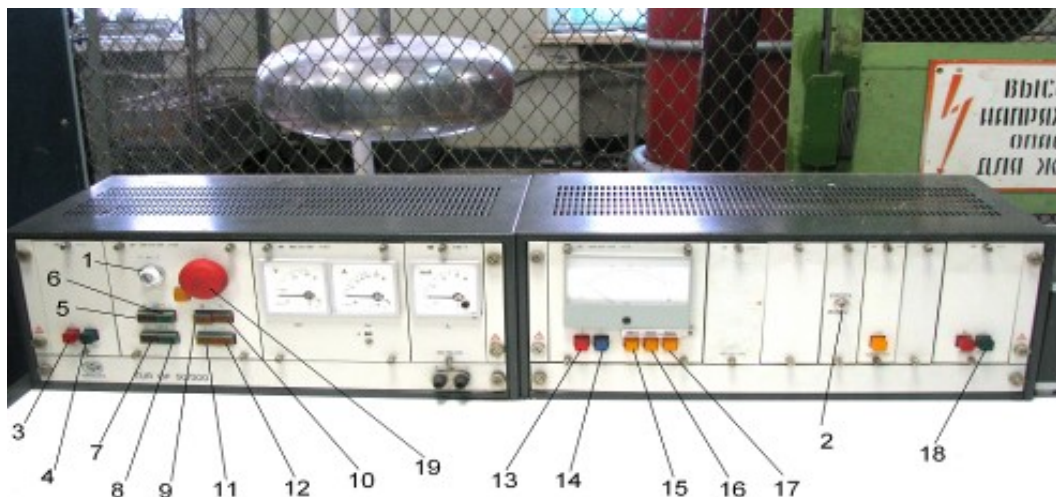


Рис. 2.4. Пульт керування лабораторним стендом

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 вимірювач високої напруги кнопкою «18».

4. Встановити, відповідно до вибраної полярності вентилів, полярність режиму роботи вимірювача високої напруги, натиснувши відповідну кнопку «13» (+) або «14» (-).

5. Встановити граничну напругу вимірювання вимірювача високої напруги на 100 кВ «17». Якщо під час проведення дослідження вихідна напруга генератора (за показаннями стрілкового приладу вимірювача високої напруги) 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 «б».

7. Встановити необхідну для досліджень відстань між електродами, перемикаючи тумблер «2» в режими «ВГОРУ» або «ВНИЗ» та «НЕЙТРАЛЬНЕ».

8. Включити кнопкою «8» контактор подачі високої напруги.

9. Почати підйом високої напруги натиснувши на кнопку «11», контролюючи процес за показаннями стрілкового приладу вимірювача високої напруги. Зниження напруги відбувається шляхом натискання на кнопку «12». **Безперервний підйом чи зниження напруги відбуваються тільки тоді, коли натискання на кнопки, відповідно «11» чи «12», не припиняється.** 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 конденсатори C_1 та C_2 , регулятор напруги повертається в початкове нульове положення. **Режим аварійного вимкнення чи автоматичного самовідключення може супроводжуватися гучним ефектом розряду конденсаторів!**

11. Напругу піднімають до виникнення повного розряду в іскровому проміжку, уважно стежачи за показаннями вимірювача високої напруги з метою фіксування значення пробивної напруги.

12. Як правило, після виникнення повного розряду в іскровому проміжку, захист генератора GP50/300 автоматично вимикає високовольтний трансформатор TR1, заземлює конденсатори C_1 та C_2 та повертає регулятор напруги в початкове нульове положення. **Вимкнення може супроводжуватися гучним ефектом розряду конденсаторів!**

13. У випадках, коли в процесі якогось із експериментів дослідження виникла необхідність його припинити не в аварійному режимі або коли за виникнення повного розряду в іскровому проміжку не спрацював захист генератора GP50/300, тоді необхідно натиснути на кнопку зменшення напруги «12» та контролювати зниження напруги за показаннями вимірювача високої напруги.

Порядок вимикання генератора постійної напруги:

1. Необхідно зменшити напругу на виході генератора до нуля шляхом натискання кнопки «12». Напругу контролювати за показаннями стрілкового приладу вимірювача високої напруги.

2. Виключити кнопкою «7» контактор подачі високої напруги.

3. Виключити кнопкою «5» головний контактор живлення генератора 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 на випробувальне поле лабораторного стенду необхідно діяти відповідно до інструкції з правил техніки безпеки. Вхід на випробувальне (високовольтне) поле без викладача ЗАБОРОНЕНО у будь-якому випадку.

Завдання

1. Встановити вентилі для отримання на виході генератора GP50/300 напруги позитивної полярності (при цьому полярність нижнього електроду-стрижня проміжку буде негативною!).

2. Встановити, у відповідності до табл.2.1, відстань між електродами іскрового проміжку у 3 см, що відповідає нижньому видимому значенню шкали стрижньового електроду 21 см.

3. Встановити необхідну границю вимірювання вимірювача високої напруги (100 кВ).

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

5. Після пробою занести значення пробивної напруги (зафіксовану за показаннями стрілкового приладу вимірювача високої напруги) до протоколу лабораторної роботи в колонку 3 для відстані 3 см, табл. 2.1.

6. Повторити дослід ще 4 рази. Значення пробивних напруг внести до протоколу в колонки 4-7 для відстані 3 см, табл. 2.1.

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

8. Попередньо вимкнувши генератор, зайти на випробувальне поле генератора GP50/300 та, наклавши переносний заземлювач спочатку на верхній вивід конденсатора C_1 , а потім на середню струмопровідну частину трансформатора TR1, встановити вентилі для отримання негативної полярності на виході генератора (при цьому полярність електрода-стрижня буде позитивною!). Знявши переносний заземлювач та розмістивши його на кінцевому вимикачі над дверима входу на високовольтне поле, вийти з поля та зачинити двері.

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

10. Виконати статистичну обробку отриманих даних шляхом розрахунку середнього значення пробивної напруги, оцінки середнього квадратичного відхилення (СКВ) та довірчого інтервалу випадкової похибки результату вимірювання пробивної напруги об'єкту спостереження з ймовірністю $P=0,95$. Визначити нижнє значення середньої розрядної напруги, витримувану напругу та середню пробивну напруженість для кожного розрядного проміжку. Результати розрахунків занести в таблиці 2.1 і 2.2.

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

Іскровий проміжок, см	Значення шкали	Пробивна напруга $U_{пр.і}$, кВ					$U_{сер}$, кВ	$\sigma(U_{сер})$, кВ	ϵ , кВ	$U_{сер-н}$, кВ	$U_{вит}$, кВ	$E_{сер}$, кВ/см	Примітка
		Номер досліду											
		1	2	3	4	5							
3	21												
5	19												
7	17												
9	15												
11	13												
13	11												

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

Іскровий проміжок, см	Значення шкали	Пробивна напруга $U_{пр.і}$, кВ					$U_{сер}$, кВ	$\sigma(U_{сер})$, кВ	ϵ , кВ	$U_{сер-н}$, кВ	$U_{вит}$, кВ	$E_{сер}$, кВ/см	Примітка
		Номер досліду											
		1	2	3	4	5							
3	21												
5	19												
7	17												
9	15												
11	13												
13	11												

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

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

13. Зробити висновок щодо впливу ефекту полярності на значення пробивних напруг у разі прикладення до повітряних проміжків постійної напруги.

Статистична обробка результатів

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

$$U_{\text{сер}} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 U_{\text{пр.і}} \quad (2.1)$$

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

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

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

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

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 у довірчому інтервалі за формулою

$$U_{\text{сер-н}} = U_{\text{сер}} - |\varepsilon| \quad (2.4)$$

5. Визначити витримувану напругу з вірогідністю 90% за ГОСТ 1516.2 [13] для кожного розрядного проміжку

$$U_{\text{вит}} = U_{\text{сер-н}}(1 - 1,3\sigma') \quad (2.5)$$

де σ' – найбільше значення у відносних одиницях стандартного відхилення. У першому наближенні σ' можна прийняти рівним найбільшому значенню стандартного відхилення для зовнішньої ізоляції при короткочасному впливі змінної напруги: $\sigma' = 0,03$ [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. Намалюйте графік розподілу напруженості електричного 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. Намалюйте графік розподілу напруженості електричного поля у цьому випадку.
5. Дайте обґрунтування рівня електричної міцності повітряного проміжку за умови різко неоднорідного електричного поля та дії змінної напруги.
6. Дайте пояснення впливу об'ємних зарядів на електричну міцність повітряних проміжків у різко неоднорідному полі.
7. Намалюйте схему випробувальної установки та дайте пояснення щодо призначення кожного з її елементів та їх взаємодії у процесі роботи.
8. Дайте пояснення відмінності у процесах формування об'ємних зарядів в між електродному проміжку при розрядах у електропозитивних та електронегативних газах.
9. Чи може проявлятися ефект полярності у розрядному проміжку з електродами площина–площина при прикладеній постійній напрузі? У якому випадку?

Лабораторна робота № 3

3. ІМПУЛЬСНА ЕЛЕКТРИЧНА МІЦНІСТЬ ПОВІТРЯНИХ ПРОМІЖКІВ (МЕТОД 50%)

з дисципліни «Техніка та електрофізика високих напруг»

(4 академічні години)

Мета роботи

Дослідження імпульсної електричної міцності повітряних проміжків при різних відстанях між електродами в однорідних і неоднорідних електричних полях; ознайомлення з методом визначення розрядної напруги $U_{50\%}$ за допомогою кульових (сферичних) вимірювальних розрядників та отримання навичок роботи на високовольтному генераторі імпульсних напруг ГІН-500 кВ.

Теоретичні відомості

Процеси в міжелектродному проміжку при дії імпульсних напруг та його імпульсна електрична міцність суттєво залежать від розподілу електричного поля в проміжку, крутизни та форми напруги, властивостей ізоляційного середовища та багатьох інших факторів. Тому найнадійніше імпульсну електричну міцність ізоляційних проміжків визначають 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 пробивної напруги при імпульсному електричному пробіі іскрового проміжку часто може 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 необхідно прискорити процеси, відповідальні за формування розряду. Це можливо реалізувати, зокрема, 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 (хвилями) напруги. Основні часові параметри імпульсу: для повного – тривалість фронту (τ_{ϕ}), повна тривалість хвилі ($\tau_{\text{хв}}$); для зрізаного імпульсу – τ_{ϕ} та передрозрядний час (τ_3). Наприклад, для стандартних *грозових імпульсів* (ГОСТ 1516.2), що застосовують для випробування ізоляції електрообладнання, часові параметри складають: $\tau_{\phi} = 1,2 \pm 0,36$ мкс, $\tau_{\text{хв}} = 50 \pm 10$ мкс, $\tau_3 = 2...5$ мкс і визначаються за рис. 3.1.

Розглянемо розвиток розряду в часі на прикладі його формування в повітряному проміжку за умов дії аперіодичного імпульсу напруги. Будемо вважати, що напруга є достатньою для формування розряду. Між моментом появи напруги (початком імпульсу) та моментом його зрізу минає деякий передрозрядний час, який інколи також позначають T_3 або T_p (час розряду). Він складається з трьох доданків (рис. 3.2):

– часу t_0 (або часто t_1), протягом якого напруга підвищується від нуля до значення U_0 , при якій виконується умова самостійності розряду (U_0 також називають статичною напругою);

– часу t_c , протягом якого у проміжку може з'явитися вільний початковий електрон завдяки зовнішнім іонізаторам, що утворює первинну лавину електронів (так званий час статистичного запізнення);

– часу формування розряду t_{ϕ} .

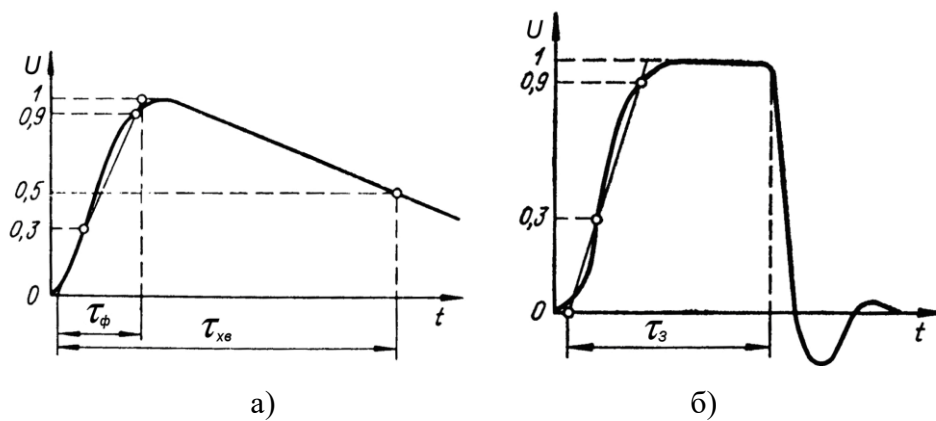


Рис. 3.1. Визначення часових параметрів повного (а) і зрізаного (б) імпульсів напруги за ГОСТ 1516.2-97

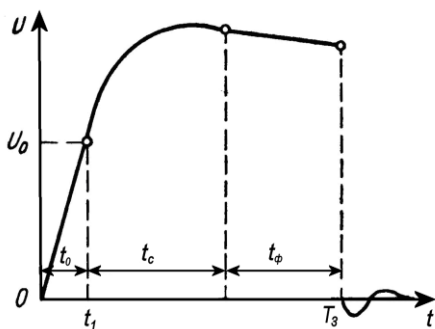


Рис. 3.2. Складові передрозрядного часу

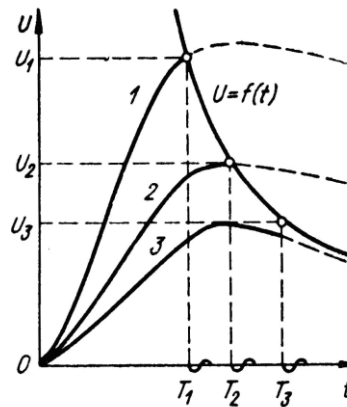


Рис. 3.3. Методика побудови вольт-секундної характеристики

Отже, повний час розряду:

$$T_3 = t_0 + t_c + t_\phi. \quad (3.1)$$

Суму двох останніх складових часто називають часом затримки розряду:

$$t_3 = t_c + t_\phi. \quad (3.2)$$

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

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

Якщо значення імпульсної напруги досягло рівня U_0 , то це ще не означає, що в момент часу t_0 розряд почне формуватися. Для цього потрібно дочекатись (час t_c), щоби в проміжку з'явився хоча б один вільний ефективний електрон. Появі електронів може сприяти дія зовнішнього іонізатора, бомбардування катоду позитивними іонами (які завжди є в повітрі) або розпад від'ємних іонів. Доля вільних електронів, що з'являються у проміжку може бути різною:

- деякі електрони (ефективні), що отримали достатню енергію в електричному полі, дадуть початок формуванню лавин електронів;

- інша частина вільних електронів може бути захоплена електронегативними нейтральними атомами/молекулами (наприклад, кисню, парів води) і утворити електронегативні іони, що остаточно нейтралізуються на аноді;

- певна частина електронів вийде за межі зони сильного електричного поля, так і не здійснивши жодного акта іонізації.

Вірогідність того, що вільний електрон стане ефективним, залежить від величини та розподілу напруженості електричного поля в проміжку. Всі згадані процеси мають випадковий характер, тому час очікування перших ефективних електронів t_c є випадковою (статистичною) величиною.

Формування розряду включає: формування лавин електронів, утворення стримерів, іскрових каналів та протікання інших електрофізичних процесів. Розміри зони розповсюдження стримерів змінюються в залежності від величини напруги і ступеня неоднорідності електричного поля. Суттєвий вплив на формування розряду мають:

- амплітуда і форма імпульсу;

- випадкове розміщення в проміжку первинних та вторинних лавин і зарядів у лавинах;
- випадковий характер траєкторії розряду, тощо.

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

Збільшення напруги призводить до зростання напруженості поля в міжелектродному проміжку, у зв'язку 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 дещо менших амплітудах імпульсів напруги розряди відбуваються поблизу амплітуди (рис. 3.3, крива 2), а при подальшому їх зниженні – 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 максимальної, тому відповідна точка так званої вольт-секундної характеристики (про неї – нижче) визначається амплітудою імпульсу, а не миттєвим значенням напруги у момент зрізу.

Імпульсну електричну міцність ізоляційного проміжку характеризують *вольт-секундною характеристикою* (ВСХ), яка встановлює зв'язок між максимальною величиною напруги імпульсу, що діяла на проміжок, і середнім часом розряду (криві $U = f(t)$ та $U(T)$ на рис. 3.3 та 3.4, відповідно).

Звичайно дослідження ВСХ супроводжується осцилографуванням напруги, що діє на ізоляційному проміжку. Серія з n осцилограм дає систему двох статистичних величин – напруги та часу розряду (рис. 3.4):

$$(U_1; T_1), \dots, (U_i; T_i), \dots, (U_n; T_n). \quad (3.3)$$

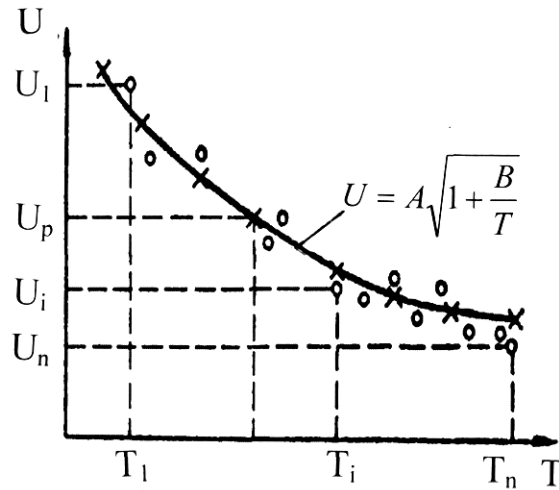


Рис. 3.4. Експериментальні точки вольт-секундної характеристики і розрахункова апроксимаційна залежність $U = f(T)$

Практично важливою є задача визначення на базі отриманих експериментальних даних параметрів апроксимаційного виразу для вольт-секундної характеристики у вигляді $U(T)$. Відомі різні формули опису вольт-секундних характеристик, але найчастіше для випадку дії грозових імпульсів використовують формулу Горєва-Машкілейсона:

$$U = A\sqrt{1 + \frac{B}{T}}, \quad (3.4)$$

де U – середня розрядна напруга для заданого часу T ; T – передрозрядний час; A, B – сталі параметри апроксимаційного виразу, що залежать від експериментально отриманої при дослідженні конкретного об'єкту системи статистичних величин U_i, T_i та результатів їх обробки (рис. 3.4).

Одна з найважливіших характеристик розрядного проміжку – так звана *п'ятидесятивідсоткова імпульсна напруга* $U_{50\%}$. Вона визначає середнє мінімальне значення амплітуди пробивної напруги для імпульсу заданої форми, при дії якого на проміжок він пробивається з імовірністю у 50 %.

Вимірювання амплітуд пробивної статичної напруги U_0 (на стенді з УПС-300 кВ, згідно опису до лабораторної роботи № 2) та напруги $U_{50\%}$ (у даній роботі, з використанням ГІН-500 кВ) дозволяє визначити так званий *коефіцієнт імпульсу* ізоляційного проміжку, що також є важливою характеристикою імпульсної міцності:

$$\beta = \frac{U_{50\%}}{U_0} \quad (3.5)$$

Для грозових імпульсів напруги в однорідних електричних полях $\beta = 1$, в неоднорідних – $\beta > 1$.

Як згадувалося, експериментально величину $U_{50\%}$ в даній роботі визначають при подачі на проміжок імпульсів від генератора імпульсних напруг 500 кВ (ГІН-500), у відповідності з рекомендаціями ГОСТ 17512-82. Амплітуду імпульсів ГІН регулюють таким чином, щоби лише половина їхньої серії призводила до іскрового розряду у досліджуваному проміжку. Для вимірювання $U_{50\%}$ в даній роботі використовують 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 така, що максимально допустиме відношення відстані між кулями S до їхнього діаметру D при вимірюваннях не повинно перевищувати

$$\frac{S}{D} \leq 0,5. \quad (3.6)$$

За умови (3.6), 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.

Для забезпечення згаданого рівня точності вимірювань поверхня куль повинна бути полірованою, чистою від пилу і сухою, а відстань від

КР до оточуючих конструкцій, що знаходяться під напругою або заземлених, повинна бути не менша певної величини та задовольняти вимогам стандарту (ГОСТ 17512-82). Відстань від куль до заземлених деталей конструкцій при $S < 0,5D$ приймають рівною $10S$. Відстань до конструкцій, що знаходяться під напругою, повинна бути на 50% більша, чим відстань до заземлених.

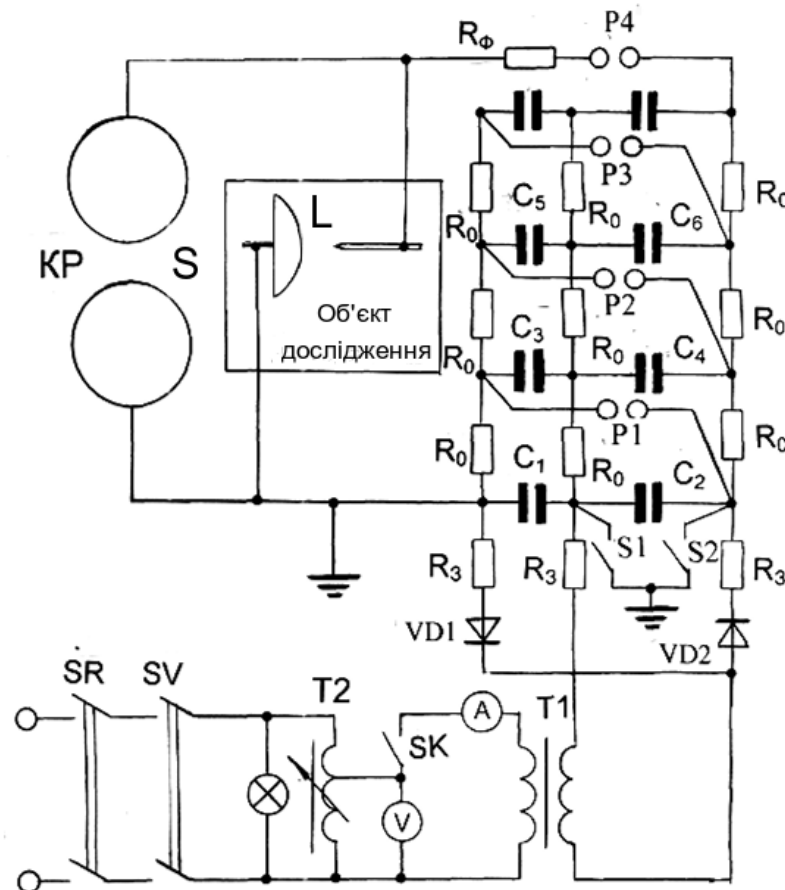


Рис. 3.5. Схема експериментальної установки з ГІН-500

Величина пробивної напруги між кулями підкоряється статистичним закономірностям, тому при декількох вимірюваннях однієї і тієї ж напруги від генератора можна спостерігати розкид отриманих результатів. Тому вимірювання на кожному рівні напруги слід проводити не менше 5-ти разів і за виміряну величину приймати середнє арифметичне значення.

Вимірювана напруга визначається шляхом визначення відстані між кулями КР (за спеціальним циферблатом на 100 поділок із двома

стрілками, для вимірювання відстані між сферами у сантиметрах з точністю до 0.01 см) і використання відповідних таблиць Додатку 2, з врахуванням полярності імпульсів та фактичних атмосферних умов.

Розрядна напруга між кулями у таблицях Додатку 2 наведена для нормальних атмосферних умов – атмосферний тиск $p_0 = 101300$ Па (760 мм рт. ст.), температура повітря $T_0 = 293$ К (20 °С). Якщо при вимірюваннях напруги атмосферні умови відрізняються від нормальних, то значення напруги, взяті з таблиць Додатку 2, повинно бути помножене на поправковий коефіцієнт K_n , який залежить від відносної густини повітря δ (табл. 3.1). Див. також формулу (1.8) у роботі № 1.

Таблиця 3.1. Поправковий коефіцієнт K_n залежно від відносної густини повітря

Відносна густина повітря δ	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,0	1,05	1,10	1,15
Поправковий коефіцієнт K_n	0,72	0,77	0,82	0,86	0,91	0,95	1,0	1,05	1,09	1,13

Відносна густина повітря

$$\delta = \frac{p}{101300} \cdot \frac{273+20}{273+t} = 0,00289 \frac{p}{273+t}, \quad (3.7)$$

де: p – атмосферний тиск, Па; t – температура навколишнього повітря, °С.

Якщо тиск поміряно у міліметрах ртутного стовпа, то вираз для обчислення відносної густини набуває вигляду

$$\delta = \frac{p}{760} \cdot \frac{273+20}{273+t} = 0,386 \frac{p}{273+t} \quad (3.8)$$

Експериментальна установка і порядок роботи на ній

Дослідження імпульсних розрядних напруг іскрових проміжків виконують зі застосуванням генератора імпульсних напруг на 500 кВ (ГІН-500). ГІН-500 складається з чотирьох конденсаторних каскадів, кожний з

яких містять по два послідовно включених конденсатори, зарядні резистори R_0 , чотири іскрових проміжки $P1 \dots P4$ і зарядний пристрій (див. раніше рис. 3.5). Ключові елементи керування установки подано на рис. 3.6.

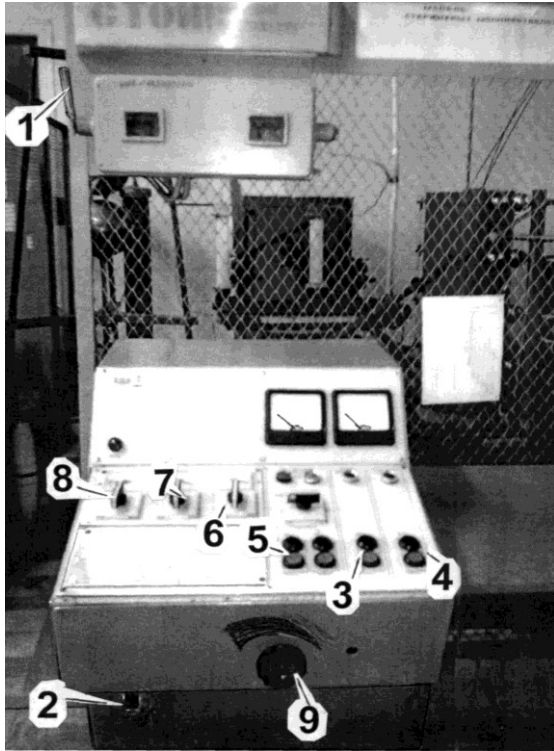


Рис. 3.6. Елементи керування
ГН-500:

1 – рубильник видимого розриву; 2 – автомат захисту; 3 – кнопки керування заземлювачами $S1$ і $S2$; 4 – кнопки технологічного режиму (мають значення за умов використання у зарядному пристрої кенотронів як випрямлячів); 5 – кнопки «ВМИК», «ВИМИК» напруги на $T1$; 6, 7, 8 – регулятори відстаней у проміжках $P1 \dots P4$, об'єкті дослідження та кульовому розряднику KP , відповідно; 9 – ручка регулювання напруги автотрансформатора $T2$

Зарядний пристрій – джерело випрямленої напруги – зібрано за схемою подвоєння напруги на базі високовольтного трансформатора $T1$, двох високовольтних збірок твердотільних діодів $VD1$ і $VD2$ (первинно схема працювала на двох кенотронах) та трьох захисних резисторів R_3 .

У роботі ГН можна виокремити два етапи. На першому відбувається заряд конденсаторів усіх каскадів ГН. 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 складаються, і на виході ГН формується одноразовий імпульс з амплітудою напруги

$$U = \eta n U_k, \quad (3.9)$$

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

Порядок вмикання ГІН-500 і роботи на ньому (рис. 3.5, 3.6):

– переносний заземлювач зняти з установки і перемістити його на гачок кінцевого пристрою блокування подачі зарядної напруги, розміщений над входними дверима стенда (на рис. 3.5 та 3.6 не показано);

– увімкнути рубильник видимого розриву контактів 1 (SR);

– увімкнути автомат захисту 2 (SV);

– за допомогою кнопки 3 керування автоматичними заземлювачами розблокувати установку і зняти автоматичне заземлення безпеки (S1, S2);

– увімкнути кнопку 4 (спрацьовує допоміжний контактор; у випадку застосування у схемі кенотронів як випрямлячів він використовується для вмикання їхнього розжарення і прогрівання перед включенням високої напруги протягом часу не менше 2 хвилини);

– чорною кнопкою 5 (SK) подати напругу від автотрансформатора Т2 на високовольтний трансформатор Т1 зарядного пристрою ГІН-500. Слід пам'ятати, що максимально допустима напруга на первинній обмотці трансформатора Т1 складає 120 В. Вимкнення живлення зарядного пристрою ГІН необхідно робити відповідною кнопкою (червоною) зразу після останнього у серії імпульсного розряду, щоби не допускати подальшого заряду ГІН і не заземлювати заряджений ГІН.

Амплітуду напруги імпульсної хвилі ГІН регулюють дистанційно з пульту керування. Наприклад, для підвищення напруги ключем-регулятором збільшують відстань між іскровими проміжками Р1...Р4, після чого виставляють допустиму частоту імпульсів (приблизно не частіше 1 імпульсу за 2 секунди). Це досягається зміною (в даному прикладі – підвищенням) зарядної напруги каскадів ГІН за допомогою регулятора напруги 9 автотрансформатора Т2.

В роботі досліджують три види повітряних іскрових проміжків з різним ступенем неоднорідності електричного поля: 1) «стрижень-заокруглена поверхня» (далі для спрощення – «стрижень-площина»); 2) «стрижень-стрижень»; 3) «площина-площина».

Процедура визначення напруги $U_{50\%}$ для досліджуваного проміжку є такою. Спочатку потрібно на ГІН виставити напругу, яка відповідає значенню $U_{50\%}$ для даного проміжку. Для цього попередньо ключем-регулятором 8 розводять сфери КР із запасом на таку відстань, щоби вони не пробивалися. Тоді всі розряди ГІН супроводжуються випадково або пробоем об'єкту, що випробовується, або розрядом конденсаторів ГІН без пробоем цього об'єкту. Тепер, змінюючи регулятором 6 одночасно відстані всіх іскрових проміжків Р1–Р4 і встановлюючи за допомогою регулятора напруги 9 трансформатора Т2 необхідну частоту появи імпульсів (не частіше одного імпульсу за 2 с), досягають такої напруги ГІН, при якій саме 50% випадків спрацювання ГІН завершуються пробоем об'єкту дослідження. Мінімально випробувальна серія складається із 10 імпульсів.

Далі за допомогою КР проводять вимірювання амплітуди імпульсу цієї напруги ($U_{50\%}$), що призводила до пробоем випробовуваного об'єкту у 50% випадків. Не змінюючи напруги трансформатора Т1 та відстаней іскрових проміжків каскадів, ключем-регулятором 8 зближують кулі вимірювального розрядника доти, доки в даній серії дослідів кількість розрядів (і ймовірність) на проміжку кульового вимірювального розрядника стане рівною кількості розрядів (і ймовірності) на випробовуваному об'єкті. Після цього, знаючи діаметр вимірювальних куль та визначену за циферблатом відстань між ними, за таблицями Додатку 2 визначають напругу $U_{50\%}$.

Доступ на випробувальне поле дозволяється лише під наглядом викладача після зниження напруги на виході автотрансформатора Т2 регулятором 9 до нульової відмітки, зняття залишкового заряду

конденсаторів ГН заземлювачами S1, S2 (червона кнопка блоку 3 керування заземлювачами, рис. 3.6), відключення рубильника видимого розриву 1 та автомата захисту 2. Після зазначених дій можна ключем відкрити двері на випробувальне поле (при відкритті дверей розмикається контакт блокування, що унеможливорює подачу напруги на зарядну частину стенду), накласти переносний заземлювач, що висить у прорізі дверей, по черзі на розрядники каскадів, починаючи з нижнього, та залишити його на верхньому вивідному контакті ГН.

Завдання і методика виконання роботи

1. Ознайомитися з вимогами охорони праці щодо безпечної роботи з ГН–500, описом конструкції установки, порядком проведення вимірювань на дослідному стенді.

2. Вивчити схему експериментальної установки і особливості роботи на ній при визначенні 50%-х розрядних напруг досліджуваних повітряних іскрових проміжків.

3. Визначити величину $U_{50\%сер}$ проміжку стрижень-площина для чотирьох відстаней L між електродами ($L_1 = 6$; $L_2 = 8$; $L_3 = 12$; $L_4 = 16$ см) при позитивній і негативній полярності імпульсної напруги на стрижні. Дані щодо щонайменше п'яти вимірювань цієї середньої величини для кожної відстані L занести у табл. 3.2.

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

5. За результатами досліджень побудувати графіки $U_{50\%сер} = f(L)$ і $U_{50\%сер} = f(S)$ для проміжків стрижень-площина і куля-куля, відповідно.

6. Повторити досліди за пп. 3...5 для інших двох видів повітряних іскрових проміжків (стрижень-стрижень і площина-площина – подібні до тих, що описано та використано у роботі №1).

7. Визначити для досліджуваних проміжків коефіцієнт імпульсу β . При визначенні коефіцієнту імпульсу слід скористатися результатами лабораторних робіт № 1 та № 2 або визначити статичну напругу на відповідному стенді (лабораторні роботи № 1 або № 2).

8. Проаналізувати отримані результати та залежності, порівняти з результатами подібних досліджень, описаними у джерелах, і записати висновки по роботі.

Таблиця 3.2. Формат представлення результатів експериментальних досліджень

Полярність	Проміжок L , см	Вид проміжку	Вимірювані характеристики	Серія вимірювань					$U_{50\% \text{ сеп}}$, кВ або S, см	Середнє квадрат. відхилення σ , кВ або см	Довірчі границі інтервалу ϵ , кВ або см	Коефіцієнт імпульсу β	Витримувана напруга, кВ
				1	2	3	4	5					
+	6	Об'єкт	$U_{50\%}$, кВ										
		КР	$U_{50\%}$, кВ										
			S, см									-	-
+	8	Об'єкт	$U_{50\%}$, кВ										
		КР	$U_{50\%}$, кВ										
			S, см									-	-
+	12	Об'єкт	$U_{50\%}$, кВ										
		КР	$U_{50\%}$, кВ										
			S, см									-	-
+	16	Об'єкт	$U_{50\%}$, кВ										
		КР	$U_{50\%}$, кВ										
			S, см									-	-

Контрольні запитання

1. Опишіть основні складові часу розряду.
2. Як залежить час t_0 від відстані між електродами і ступеню 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? Як її отримують?
5. Чи відрізняються ВСХ для проміжків з однорідним та неоднорідним електричним полем?
6. Що характеризує напруга $U_{50\%}$? Покажіть її на ВСХ.
7. Поясніть процедуру вимірювання імпульсної розрядної напруги $U_{50\%}$ проміжку стрижень-площина за допомогою кульового розрядника.
8. Як впливає полярність імпульсу на значення розрядної напруги проміжку стрижень-площина?
9. Які основні часові параметри випробувальних імпульсів та як їх визначають? Наведіть параметри різних випробувальних імпульсів напруги та струму.
10. Для чого застосовують кульові розрядники в даній роботі? Назвіть та поясніть вимоги, які потрібно виконувати для забезпечення точності вимірювання кульовими розрядниками.
11. Що таке коефіцієнт імпульсу β і від чого залежить його величина? Наведіть приклади його значень.
12. Які основні елементи ГІН-500 та як він працює? Назвіть особливості експлуатації даного ГІН.
13. Як можна регулювати амплітуду вихідної напруги ГІН?
14. Які заходи безпеки передбачено при виконанні лабораторної роботи?

Лабораторна робота №4

4. ЕЛЕКТРИЧНА МІЦНІСТЬ ВЗДОВЖ ПОВЕРХНІ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ У ПОВІТРІ

з дисципліни «Техніка та електрофізика високих напруг»

(4 академічні години)

Мета і основні завдання роботи

Мета: Дослідження електричної міцності ізоляційних конструкцій при розвитку розряду в повітрі вздовж поверхні твердого діелектрика в умовах дії змінної напруги промислової частоти для конфігурацій, що відповідають переважанню нормальної та тангенціальної складової електричного поля.

Основні завдання роботи:

- одержати експериментальні значення розрядних напруг і напруженостей електричного поля в конструкціях з комбінованою ізоляцією, в яких поле має переважаючу тангенціальну складову;
- одержати експериментальні значення розрядних напруг і напруженостей в конструкціях з комбінованою ізоляцією, в яких поле має переважаючу нормальну складову;
- провести статистичну обробку результатів досліджень;
- порівняти отримані експериментальні результати з такими, що відповідають існуючим практичним апроксимуючим 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

газових діелектриків, викликає необхідність дослідження електричної міцності газів з урахуванням впливу діелектричної поверхні та конфігурації електричного поля всієї конструкції.

Виходячи з конфігурації ізоляційної конструкції та характеристик електричної міцності твердих та газових діелектриків пробій звичайно відбувається у проміжку з газовим середовищем. На електричну міцність проміжку у газі при розряді вздовж поверхні твердих діелектриків впливають: конфігурація електричного поля, форма діючої напруги, довжина міжелектродного проміжку, конструктивні характеристики і електричні властивості діелектрика, а також стан його поверхні (зволоження, забруднення).

Характер розряду і розрядні напруги по поверхні твердого діелектрика в умовах однорідного та неоднорідного електричного поля в значній мірі визначаються співвідношенням тангенціальної та нормальної складових напруженостей цього поля – E_τ та E_n (рис. 4.1).

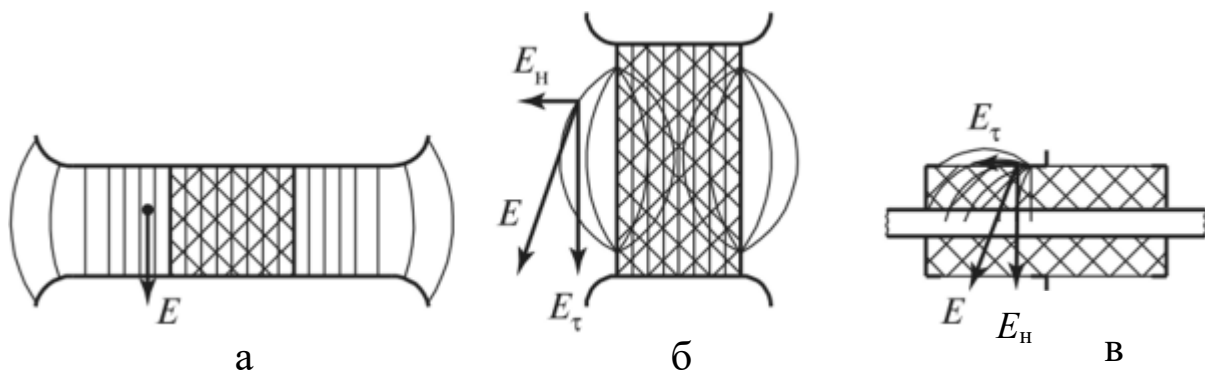


Рис.4.1. Електричне поле в деяких конструкціях с повітряними проміжками і твердим діелектриком:

а – квазіоднорідне поле; б – поле з домінуючою тангенціальною складовою E_τ ; в – поле з домінуючою нормальною складовою E_n

В лабораторній роботі для дослідження пропонуються наступні конфігурації (рис. 4.2).

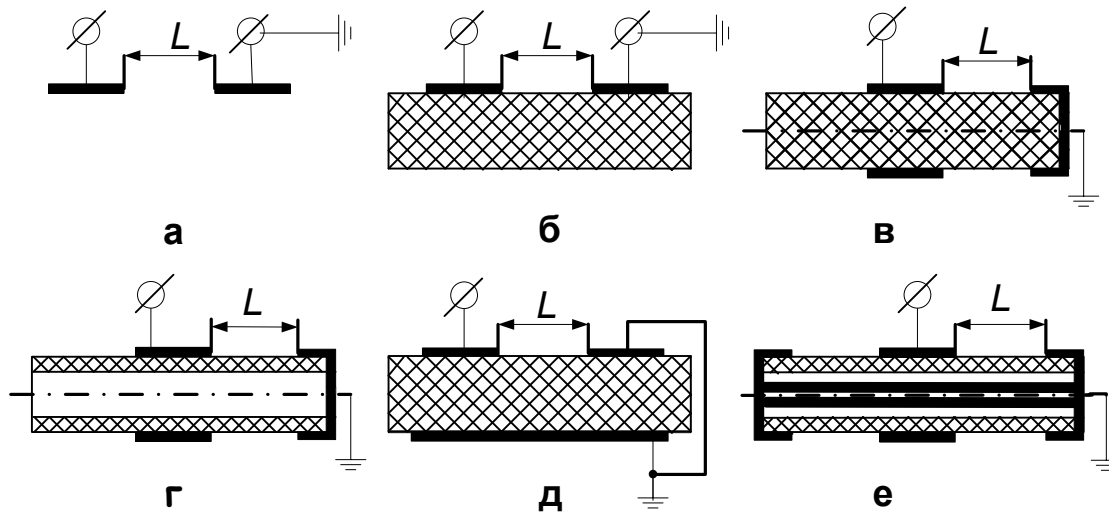


Рис.4.2. Електродні системи і ізолятори для дослідження перекриття вздовж поверхні твердого діелектрика:

▨ - твердий діелектрик; ■ - металеві електроди.

Якщо переважає тангенціальна складова напруженості електричного поля (рис.4.2б-г), то розрядні напруги вздовж поверхні твердого діелектрика є дещо меншими за розрядні напруги у повітряних проміжках між аналогічними за формою електродами. Наприклад, так можна порівнювати конфігурації рис.4.2б та 4.2а. Це певне зменшення напруги пояснюється присутністю на поверхні діелектрика адсорбованої плівки води чи забруднень та мікрозозорами між поверхнями електродів та діелектрика.

У випадку наявності значної нормальної складової напруженості електричного поля (рис.4.2д та 4.2е), розрядні напруги та напруженості є значно меншими, аніж у випадку переважаючої тангенціальної складової електричного поля у частково схожих конструкціях (тобто у порівнянні з

конфігураціями на рис.4.2б та 4.2г). Це пояснюється наступними особливостями розвитку розряду вздовж поверхні.

При відносно невеликій напрузі біля електродів спостерігається корона, яка охоплює певну площу поверхні діелектрика. Збільшення напруги супроводжується появою каналів із слабким світінням (стрімерів), які при подальшому підвищенні напруги перетворюються у *ковзні розряди*, які характеризуються значно більшими провідністю та світінням. В ковзних розрядах протікає значний струм, зумовлений процесом іонізації повітря. Цей змінний струм у значній мірі є залежним від ємності ковзного розряду відносно протилежного електроду та частоти прикладеної напруги.

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

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

де C_{Π} - питома поверхнева ємність, тобто ємність одиниці площі поверхні, по якій розвивається розряд, по відношенню до протилежного електроду ($\text{Ф}/\text{см}^2$). Розрахунки за формулою (4.1) дають досить добре збігання з дослідями для плоского діелектрика або трубки великого діаметру у випадках $C_{\Pi} \geq 0,25 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}/\text{см}^2$.

При незначній товщині діелектрика питому поверхневу ємність для випадку плоского конденсатора ($\text{Ф}/\text{см}^2$) визначають за формулою

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

де Δ – товщина діелектрика; $\varepsilon, \varepsilon_0$ – відносна та абсолютна діелектричні проникності.

Падіння напруги у ковзному розряді є незначним, тому високий потенціал електроду переноситься каналом вглибину проміжку. При цьому

розвиток розряду полегшується і довжина каналів ковзного розряду далі збільшується за рахунок підвищення напруженості у не перекритій частині проміжку, протіканню більшого струму з усіх частин каналу та зростанню температури і провідності каналу. Тому процес швидко завершується повним перекриттям діелектричної конструкції.

Довжину каналу ковзного розряду $l_{\text{ковз}}$ в залежності від прикладеної напруги U та питомої поверхневої ємності $C_{\text{п}}$ можна оцінити за емпіричною формулою Теплера:

$$l_{\text{ковз}} = k_1 C_{\text{п}}^2 U^5 \sqrt{\frac{dU}{dt}}, \quad (4.3)$$

де k_1 – коефіцієнт, що визначають дослідним шляхом; U – діюча напруга, $\frac{dU}{dt}$ – 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 напругу повного перекриття проміжку U_p для плоского твердого діелектрика можна визначити наступним чином:

$$U_p = k_2 L^{0,2} \left(\frac{\Delta}{\varepsilon}\right)^{0,4}, \quad (4.4)$$

де $k_2 = \text{const}$ (у випадку напруги промислової частоти $k_2 \approx 58$ для $L \geq 5$ см).

У загальному випадку залежність для розрядної напруги вздовж поверхні можна наближено представити як

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

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

Зволоження та забруднення поверхні діелектрика значно знижують величину розрядної напруги. Для збільшення розрядної напруги вздовж поверхні ізоляційної конструкції застосовують різні способи, зокрема вибирають матеріал діелектрика з меншою діелектричною проникністю та гідрофобними властивостями, використовують ребра на ізоляторах, гідрофобні мастики, напівпровідникові покриття, закладні електроди для вирівнювання поля, ретельно виконують конфігурацію стику електродів та твердого ізолятора, уникаючи мікрозазорів, збільшують діаметр прохідних ізоляторів та ін. Як видно із залежності (4.4) просте збільшення відстані між електродами не є досить ефективним для підвищення розрядної напруги вздовж поверхні.

Експериментальний стенд та робота на ньому

Принципову схему експериментального стенду представлено на рис.4.3. Джерелом високої напруги промислової частоти слугує випробувальний трансформатор Т1 типу ИОМ–100/25 з 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 (водяний) призначений для обмеження струму розряду, що необхідно для захисту трансформатора від перевантажень.

Плавне регулювання напруги трансформатора Т1 здійснюється регулятором напруги Т2.

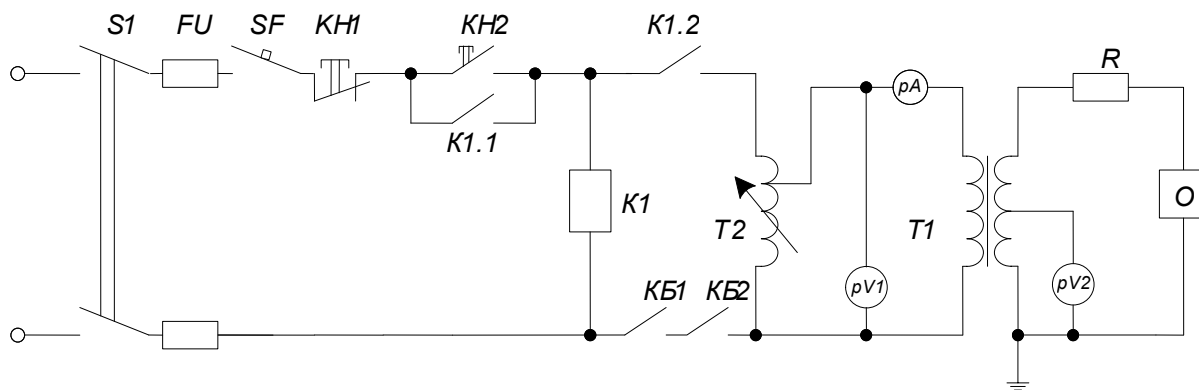


Рис.4.3. Схема експериментального стенду

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 контакти кнопки КН2 стають на самоблокування, тобто кнопка може бути відпущена (і 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 здійснюється 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 випробуваних ізоляційних конструкцій, які розташовані на випробувальному полі, можливий лише за умови, що стенд цілком відключено, а на високовольтний вивід обмотки трансформатора Т1 накладено переносний заземлювач.

Завдання та методика виконання роботи

1. Ознайомитися з основними теоретичними положеннями щодо електричного розряду в повітрі вздовж поверхні твердих діелектриків.
2. Ознайомитися зі схемою та порядком роботи на стенді.
3. Вивчити правила техніки безпеки при роботі на дослідному стенді.
4. Експериментально одержати значення розрядних напруг і напруженостей для ізоляційних конструкцій згідно програми досліджень, яку узгоджено з викладачем.

За допомогою шаблонів встановлюють певні відстані (2 ...10 см) між електродами для моделей з різними конфігураціями електричного поля та визначають розрядні напруги і середні розрядні напруженості досліджуваних проміжків. Значення розрядної напруги слід фіксувати при повному перекритті ізоляційного проміжку першим іскровим чи дуговим каналом (рис. 4.4). Кількість дослідів на кожній конструкції та для кожної відстані між електродами повинна бути не менше п'яти. Результати досліджень та розрахунків заносять у таблиці.

Додаткове завдання: реєструвати також напругу початку виникнення ковзних розрядів; зробити фотографії характерних картин розвитку розрядів.

5. Виконати статистичну обробку отриманих даних: розрахувати середнє квадратичне відхилення σ_0 та границі довірчого інтервалу ε

випадкової похибки результатів спостереження розрядної напруги для кожної відстані з імовірністю $P = 0,95$ (див. Додаток 1). Результати обробки занести в табл. 4.1.

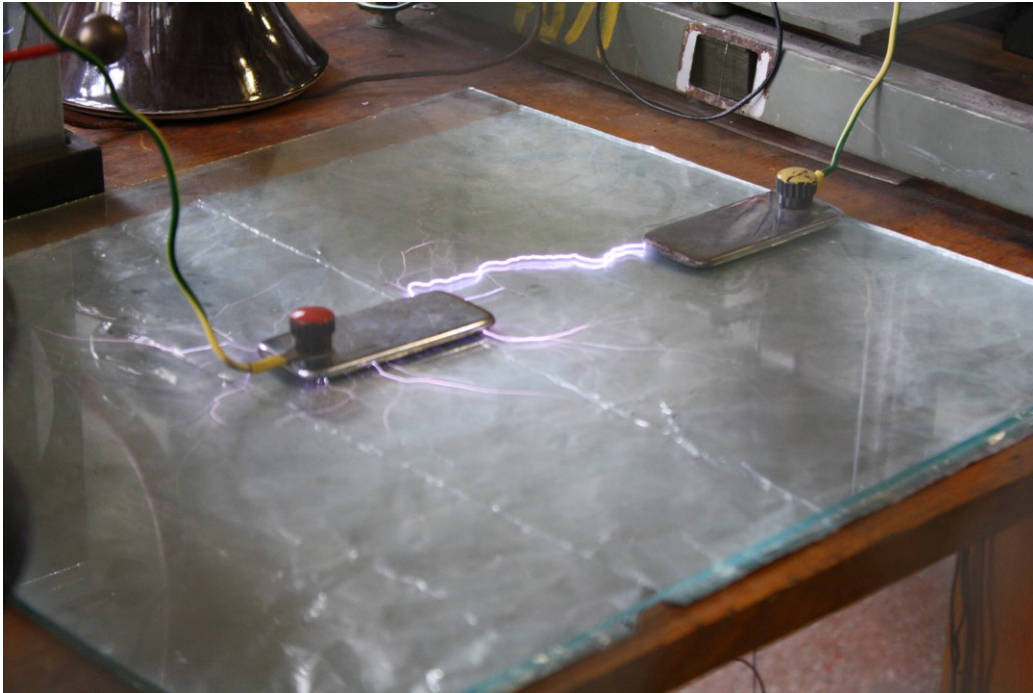


Рис. 4.4. Фото розрядів під час випробувань моделі ізоляційної конструкції за рис. 4.2д (відстань між електродами – 10 см)

Додаткове завдання: визначити напруги $U_{\text{вит}}$, які може витримувати кожна ізоляційна конструкція.

6. За результатами досліджень всіх конструкцій побудувати два графіки з залежностями від відстані між електродами: (а) розрядних напруг та (б) напруженостей електричного поля.

Додаткове завдання: на графіках показати межі розрахованих статистичних відхилень та розраховані величини напруг, які можуть витримувати досліджувані ізоляційні конструкції.

7. Для розрядних напруг всіх конструкцій в дослідженому інтервалі відстаней визначити апроксимаційні формули залежності $U_p = f(L)$ та

побудувати згідно них криві. Порівняти отримані залежності з відповідними результатами інших дослідників (знайти в літературі та теж навести на графіках).

8. Зробити висновки по роботі та оформити протокол.

Табл. 4.1 Результати експериментів та розрахунків

Форма розрядного проміжку	$L, \text{ см}$	Розрядна напруга $U_p, \text{ кВ}$					$U_{\text{ср}}, \text{ кВ}$	$\sigma(U_{\text{ср}}), \text{ кВ}$	$\varepsilon, \text{ кВ}$	$U_{\text{ср}}, \text{ кВ}$	$U_{\text{вит}}, \text{ кВ}$	$E_{\text{ср}}, \text{ кВ/см}$
		Номер досліду										
		1	2	3	4	5						
Рис. 4.2а												
Рис. 4.2б												
Рис. 4.2в												
Рис. 4.2г												
Рис. 4.2д												
Рис. 4.2е												

Контрольні запитання

1. З якими реальними ізоляційними конструкціями можна порівняти досліджувані в роботі міжелектродні проміжки?
2. Які фізичні умови призводять до появи ковзних розрядів?
3. Як залежить електрична міцність по поверхні твердого діелектрика від його матеріалу у випадку переважаючої нормальної складової електричного поля?
4. Як залежить електрична міцність по поверхні твердого діелектрика у випадку переважаючої нормальної складової електричного поля від його товщини?
5. Як залежить електрична міцність по поверхні у випадку переважаючої нормальної складової електричного поля від довжини міжелектродного проміжку по поверхні?

6. Як визначають питому поверхневу ємність ізоляційної конструкції? Порівняйте її для будь-яких двох конструкцій.

7. Як впливає величина питомої поверхневої ємності на величину початку ковзних розрядів? В чому полягають фізичні причини такого впливу?

8. Як визначити розрядну напругу вздовж поверхні твердого діелектрика у випадку переважаючої нормальної складової електричного поля?

9. Чи будуть відрізнятися розрядні напруги перекриття по поверхні двох прохідних ізоляторів з різними діаметрами за однакової довжини розрядного шляху вздовж поверхні L ? Розглянути варіанти збереження постійним: (а) внутрішнього діаметру вводу та (б) товщини стінки вводу.

10. Які методи використовуються для збільшення електричної міцності вздовж поверхні ізоляційних конструкцій у випадку переважаючої нормальної складової електричного поля?

11. Порівняйте електричну міцність вздовж поверхні конструкцій «в», «г», «є». Як впливає на цю міцність збільшення діаметру конструкцій «в» та «г»?

Лабораторна робота № 5

5. БАР'ЄРНИЙ ЕФЕКТ У ПОВІТРЯНИХ ПРОМІЖКАХ НА ВИПРЯМЛЕНІЙ ТА ЗМІННІЙ НАПРУГАХ

з дисципліни «Техніка та електрофізика високих напруг»

(4 академічні години)

Мета роботи

Ознайомитися з методом підвищення електричної міцності газової ізоляції шляхом використання бар'єрів на прикладі експериментів у повітряних проміжках з неоднорідним електричним полем. Дослідити вплив діелектричних перегородок (бар'єрів) та екранів з провідних матеріалів на електричну міцність газових проміжків.

Теоретична частина

Застосування діелектричних бар'єрів є одним із способів підвищення електричної міцності ізоляційних проміжків. Бар'єри встановлюють на певній відстані від електродів з підвищеною напруженістю електричного поля, де можна очікувати коронування. Бар'єри застосовують в різних видах ізоляції (газовій, рідинній та ін.). В даній роботі бар'єрний ефект досліджується для газових (повітряних) проміжків.

Дія бар'єру пов'язана з осіданням і накопиченням на ньому електричних зарядів того ж знаку, що і на коронуючому електроді. Поле цих зарядів призводить до зменшення напруженості результуючого електричного поля між коронуючим електродом та бар'єром, що збільшує міцність цієї частини ізоляційного проміжку. З другого боку бар'єру поле між ним та іншим електродом дещо збільшується, але це поле стає більш

однорідним у порівнянні з тим, яке було б без бар'єру. Обидві зазначені зміни поля з двох сторін бар'єру забезпечують підвищення електричної міцності усього ізоляційного проміжку.

Величина збільшення електричної міцності проміжку в разі застосування бар'єру залежить від місця розташування бар'єру відносно коронуючого електроду (рис. 5.1). Найбільша міцність досягається при розташуванні бар'єру на відстані $1/5 - 1/6$ довжини всього проміжку.

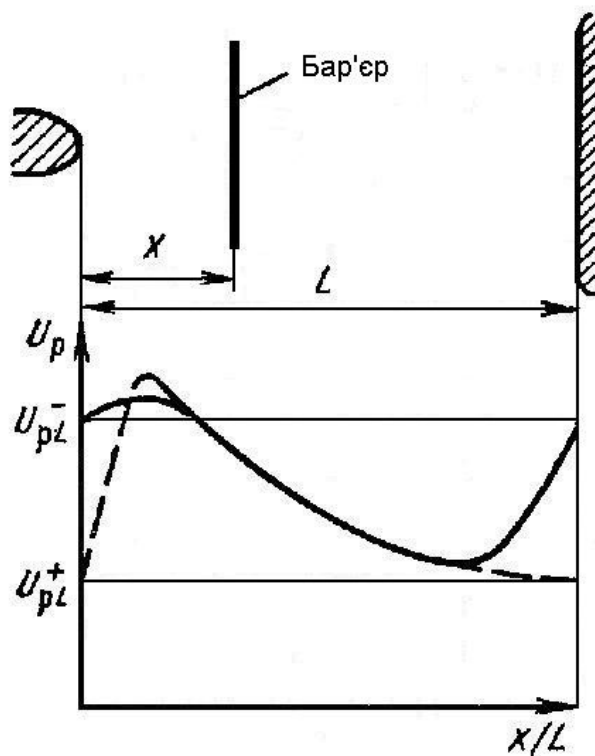


Рис. 5.1. Вплив місця розташування бар'єру на ефективність його дії для двох полярностей коронуючого електроду за постійної прикладеної напруги:

товсті лінії: позитивна полярність – штрихова; негативна – суцільна;

тонкі прямі лінії: U_{pL}^+ та U_{pL}^- – розрядні напруги проміжку у разі відсутності бар'єру для позитивної та негативної полярностей коронуючого електроду

Бар'єрний ефект спостерігається при постійній, змінній та імпульсній напрузі. В випадку імпульсної напруги він проявляється слабше. В даній роботі досліджується вплив бар'єрів у випадку дії випрямленої та змінної напруги. При позитивній полярності коронуючого електроду електрична міцність проміжку зростає приблизно в 2 – 3 рази, при негативній – в 1,2 – 1,3 рази.

Застосування суцільних та сітчастих провідних перегородок у ізоляційному проміжку являє собою використання частково екрануючих електродів.

Експериментальна установка та порядок роботи

Експериментальна установка складається з двох частин, розмежованих сітчастою огорожею. На одній частині (низьковольтній – місце роботи оператора) розташовано пульт керування, що дозволяє подавати, регулювати і вимірювати напругу, яка подається на повітряні проміжки між електродами стрижень-площина з різними бар'єрами (або екранами) для визначення електричної міцності цих проміжків, а також дистанційно виставляти відстань між зазначеними електродами. На другій частині (високовольтній – випробувальне поле) розміщено джерело високої напруги та конструктивні елементи, що дозволяють встановлювати і переміщувати електроди та бар'єри. Початкове виставлення електродів і відстань між ними здійснюють вручну (можна із використанням шаблону відстані).

Принципову схему експериментальної установки подано на рис. 5.2.

Джерелом високої напруги є випробувальний трансформатор *ТІ* типу ИОМ-100/25. Варто пам'ятати, що при вимірюваннях вольтметром *PV1* отримують діючі значення напруг. Для отримання амплітудних значень, які власне і відповідають пробивним напругам, що визначаються в процесі експериментів, показання вольтметра *PV1* слід помножити на $\sqrt{2}$.

В схемі передбачена можливість дистанційної зміни відстаней між електродами повітряного проміжку за допомогою електродвигуна *М*, яким управляють за допомогою ключа з пульта керування. В даній роботі цю відстань виставляють один раз, а відстань від бар'єра до стрижня змінюють в кожній серії дослідів вручну (на високовольтному полі).

Плавне регулювання напруги випробувального трансформатора здійснюється регулятором $T2$.

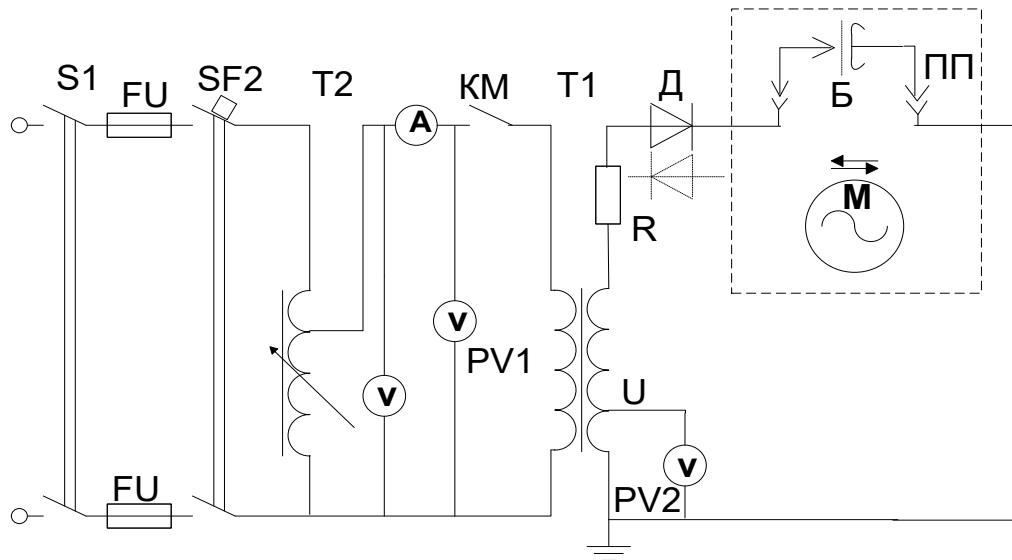


Рис. 5.2. Схема експериментальної установки

$S1$ – рубильник видимого розриву; FU – запобіжники; $SF2$ – автоматичний вимикач; $T2$ – регулятор напруги; KM – контактор; $T1$ – випробувальний трансформатор; R – захисний резистор; $PV1$ – вимірювальний вольтметр (на схемі без додаткових позначок вказані також амперметр A і вольтметр V , які є щитовими, мають низький клас точності і які під час вимірювань не застосовують); U – спеціальна обмотка для вимірювання високої напруги трансформатора $T1$ за допомогою вольтметра $PV2$, шкалу якого градуйовано в кіловольтах; $ПП$ – повітряний проміжок з бар’єрами чи екранами; M – електродвигун дистанційного регулювання відстаней між електродами $ПП$; D – випрямний діодний блок; $Б$ – бар’єр або екран

Вмикання установки виконується за допомогою рубильника $S1$ з можливістю візуального спостереження розриву, автоматичного вимикача $SF2$ і контактора KM (контактор спрацьовує після натискання чорної кнопки вмикання «Високої напруги» на пульті керування). В ланцюг живлення електромагніта контактора увімкнені контакти (на схемі не показані) блокування подавання напруги на випробувальний трансформатор у випадку відчинення дверей сітчастої огорожі та зняття з

кінцевого вимикача штанги переносного ручного заземлювача для виконання робіт на високовольтній частині установки (див. подібні елементи схеми на рис. 4.3 в лабораторній роботі №4 з дослідження розряду вздовж поверхні твердих діелектриків).

Резистор R призначений для обмеження перевантажень по струму трансформатора $T1$ під час виникнення електричних пробів у досліджуваному повітряному проміжку (III). В момент пробою автоматичний вимикач $SF2$ вимикає установку. Якщо з якихось причин він не спрацює, необхідно без затримки зняти напругу вручну шляхом натискання на пульті червоної кнопки «Вимкнути». Як згадувалося, значення пробивної напруги в цій роботі вимірюють за допомогою вольтметра PVI .

Виконання будь-яких операцій на високовольтному полі можливе лише після повного відключення установки і накладення переносного заземлювача на високовольтний вивід трансформатора $T1$.

Бар'єри чи інші перегородки (екрани, сітки) з різних матеріалів та різних видів по чергово закріплюють на ізолювальній конструкції, і напругу випробувального трансформатора $T1$ за допомогою регулятора напруги $T2$ підвищують до значень, за яких виникає пробій проміжку III .

Для бар'єру чи екрану певного виду на поточній його позиції (L) при незмінній відстані між електродами стрижень-площина 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 $U_{пр.сер}$. Потім заходять на поле та змінюють позицію бар'єру, тобто відстань L між бар'єром та електродом-стрижнем. Далі процедура визначення пробивної напруги повторюється.

В якості модельних бар'єрів та перегородок в роботі використовують:

- бар'єри з електротехнічного та канцелярського паперу (електрична міцність 1000 - 500 В), картону, у тому числі з перфораціями, в один та два шари;

- сталеву фольгу, металеві сітки з різними вічками (10x10 та 20x20 мм), металізовану з одного боку діелектричну рамку, склопластик.

Результати заносять у таблиці, приклад формату якої подано у табл. 5.1. Такі таблиці виводять для кожної полярності та змінної напруги. На змінній напрузі досліди з усіма моделями необхідно виконати для відстаней лише у 0.5 та 1 см бар'єрів/екранів від стрижня.

Методика виконання роботи та завдання

1. Ознайомитися з теорією бар'єрного ефекту.

2. Ознайомитися з правилами роботи на високовольтному стенді (інструктаж). Замалювати схеми електричної частини, пристрій для встановлення бар'єрів та записати перелік і характеристики бар'єрів, що будуть досліджуватись. Приготувати таблиці для реєстрації експериментальних даних.

3. Експерименти на випрямленій напрузі проводять з проміжком "стрижень-площина" згідно описаному вище порядку роботи для зазначених в табл. 5.1 видів бар'єрів – по чергово для *двох полярностей* та фіксованій відстані між електродами (4 см) і змінній відстані між бар'єром та стрижнем-електродом (з кроком 0.5 см). На змінній напрузі досліди слід виконати лише у двох положеннях бар'єру (0.5 та 1 см від стрижня) для зазначених в пункті "Експериментальна установка" видів бар'єрів.

3.1. Спочатку визначають розрядну напругу без встановлення бар'єру у рамку (з пустою рамкою). Або використовують відповідні дані з роботи № 1, якщо вона вже виконувалась бригадою.

3.2. Для перших трьох видів бар'єрів в табл. 5.1 (папір, фольга) визначають залежність розрядної напруги від відстані між бар'єром та стрижнем (з градацією 0.5 -1 см).

3.3. Потім проводять порівняльні експерименти з іншими різними бар'єрами / перегородками (див. табл. 5.1 та пункт “Експериментальна установка”), що встановлюють на одних і тих самих відстанях (приблизно 0.5 та 1 см) від коронуючого електроду (стрижня).

4. Обробити експериментальні дані (див. Додаток 1), представити у вигляді графіків. Описати ефекти, що спостерігалися. Виконати фотографування характерних картин розвитку розрядів та пошкоджень бар'єрів.

5. Зробити висновки за результатами роботи. Пояснити спостереження. Вказати на можливі застосування. Порівняти отримані результати з залежностями, що описуються у літературі (записати дані з джерел у стовпчик $U_{розр.}$). Відзначте спостереження щодо температури каналу розрядів різних типів.

6. Оформити протокол роботи.

Техніка безпеки

Роботу виконують згідно правил техніки безпеки на кафедрі теоретичної електротехніки. 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.

УВАГА: В дослідях з використанням паперу як бар'єру під час електричного розряду можливе вогнезаймання паперу. Необхідно уважно виконувати всі правила безпечної роботи у електроустановках та в лабораторіях кафедри, включаючи правила протипожежної безпеки. Зокрема слідкувати за наявністю металевого піддону під розрядним

Таблиця 5.1. Результати експериментів, розрахунків та з джерел

Бар'єр або екран	L, см	$U_{пр}, \text{кВ}$					$U_{пр\text{ сер.}}, \text{кВ}$	$\sigma, \text{кВ}$	$\varepsilon, \text{кВ}$	$E_{пр\text{ сер.}}, \text{кВ/см}$	$U_{розр.}, \text{кВ}$	$U_{вит.}, \text{кВ}$
		U_1	U_2	U_3	U_4	U_5						
Папір	0											
	0.5											
	1.0											
	1.5											
	2.0											
	2.5											
	3.0											
	3.5											
	4.0											
Папір (2 шари)	0											
	0.5											
	1.0											
	1.5											
	2.0											
	2.5											
	3.0											
	3.5											
	4.0											
Фольга	0											
	0.5											
	1.0											
	1.5											
	2.0											
	2.5											
	3.0											
	3.5											
	4.0											
Папір з перфорац.	0.5											
	1.0											
Сітка (10x10 мм)	0.5											
	1.0											
Сітка (20x20 мм)	0.5											
	1.0											
Металізов. рамка	0.5											
	1.0											
Картон	0.5											
	1.0											
Склопластик	0.5											
	1.0											

проміжком, за залишками паперу, що зайнявся, і при необхідності вимкнути напругу на стенді та загасити їх. Після закінчення роботи – прибрати робоче місце.

Контрольні запитання

1. Фізичний принцип використання бар'єрів.
2. Приклади застосування бар'єрів в реальних конструкціях.
3. Особливості дії бар'єрів у випадках (+) та (-) полярностей електроду з більшою кривизною.
4. Наведіть пояснення щодо дії бар'єрів на змінній напрузі.
5. Вплив місця розташування бар'єру на ефективність його дії.
6. Як впливає електрична міцність та провідність матеріалу бар'єру на його дію?
7. Як зміниться міцність проміжку, якщо як бар'єр замість одного шару паперу взяти два-три шари?
8. Яку поведінку можна прогнозувати для паперового бар'єру з перфораціями? Що можна сказати щодо впливу розмірів та місця розташування перфорацій?
9. Який вплив на електричну міцність проміжку можна очікувати від розміщення в ньому сталеві суцільної фольги чи сіток з різними за розмірами вічками?
10. Яке співвідношення електричних міцностей повітряного проміжку можна очікувати під час використання запланованих для дослідження у роботі моделей бар'єрів/перегородок?
11. Як зміниться ефективність бар'єру з паперу у випадку підвищення вологості повітря?
12. Порівняйте ефективність бар'єрів при різних видах напруги на ізоляції.

Лабораторна робота № 6

6. ЗОНИ ЗАХИСТУ СТРИЖНЕВИХ БЛИСКАВКОВІДВОДІВ

з дисципліни «Техніка та електрофізика високих напруг»

(4 академічні години)

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 ГН-500 кВ.

Теоретичні відомості

При прямому ураженні споруд блискавками, якщо вони не мають системи блискавкозахисту, може відбутися їхнє пошкодження, руйнування, пожежі та виникати небезпека для живих істот і обладнання. У випадку прямих уражень блискавками електроустаткування 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 з високою ймовірністю 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. Гророва хмара й лідер блискавки, що з неї опускається (рис. 6.1), індують 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 (позитивно заряджених).

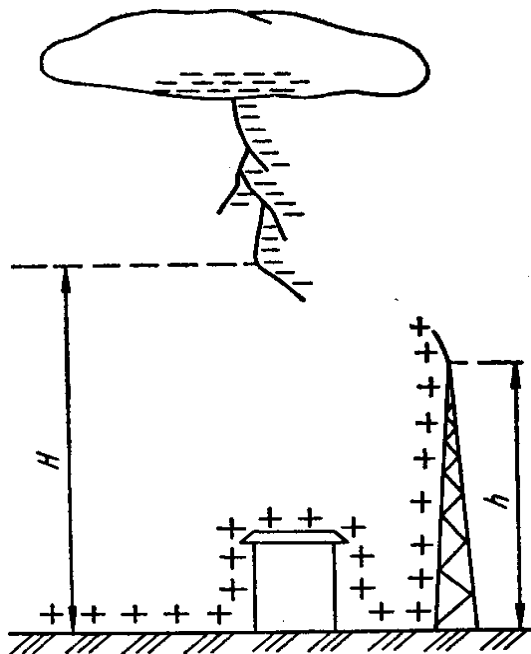


Рис. 6.1. Розвиток блискавки і зустрічного лідера

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 захисту. Далі струм блискавки відводиться за допомогою струмовідводів до заземлювачів, а з них – у землю.

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. Цей підхід базується на так званих електрогеометричних моделях (ЕГМ).

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, за деякими попередніми методиками, приймали певну ефективну висоту, яка дещо менша за його фактичну повну висоту. За підходами ЕГМ, теж отримують, що, починаючи з певних збільшених висот блискавкоприймача, його ефективність перехоплення блискавок із відносно невеликими струмами не зростає.

Загально надійність блискавкозахисту (P_3) пов'язують з числом β проривів блискавок 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 у 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 $\psi \leq 10^{-3}$.

Одним із завдань при проектуванні або перевірці систем зовнішнього блискавкозахисту різних об'єктів є визначення так званих захищених

об'ємів (у попередніх вітчизняних стандартах – «зон захисту»; у новітніх міжнародних стандартах цей термін застосовують у іншому значенні). Для цього у нормативних документах наведено відповідні методики, формули, таблиці, рисунки. До 2008 в Україні була чинною Інструкція з блискавкозахисту [10] (вона і дотепер залишається чинною в Росії поряд з новішими нормами), яка основана на ймовірнісному підході. З 2009 року в Україні було введено ДСТУ Б В.2.5.-38:2008 [11], який введено з січня 2009 року. У ньому, частково враховані положення міжнародних стандартів, які вже включають електрогеометричні підходи, але в той же час залишено ряд таблиць і рекомендацій, які базуються на застарілих лише ймовірнісних підходах. Вимоги цього стандарту розповсюджувалися 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 рекомендувалося виконувати галузеві вимоги.

З 2012 року в Україні методом підтвердження введено у дію серію міжнародних стандартів з блискавкозахисту ДСТУ МЕК 62305 [12]. Лише окремі положення ДСТУ Б В.2.5.-38:2008, який продовжував бути чинним до 2019 року, збігалися з цим новим міжнародним стандартом.

Для ознайомлення із застосуванням інженерних методик розрахунку зон захисту в даній лабораторній роботі пропонується виконати визначення захищених об'ємів за [11] і [12] та порівняти отримані результати між собою та з результатами експериментальних досліджень зон захисту на моделях. Необхідні для розрахунків в даній лабораторній роботі витяги з цих нормативних документів наведено нижче.

Згідно [11], 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 [11] в залежності від очікуваної кількості уражень об'єкта блискавкою за рік N , суспільного значення і тяжкості наслідків від дії блискавки.

У стандарті ДСТУ МЕК 62305 немає поділу на звичайні та спеціальні об'єкти. Необхідний рівень (пов'язаний з надійністю) блискавкозахисту вибирається на основі аналізу різноманітних ризиків загроз та втрат і порівняння їх з допустимими рівнями. Враховують різні джерела небезпеки (і їхнє місце), типи пошкоджень, типи втрат та ін. Наприклад, серед ризиків втрат розглядають загрозу життю людей, втрат громадських послуг, культурних цінностей, економічних втрат. Також – ризики руйнувань, пожежі, пошкодження електричних та електронних

компонентів. Таких РБЗ існує чотири (I – IV), як у [12], так і у [11]. Відповідно до необхідного РБЗ визначають клас системи блискавкозахисту (СБЗ), що забезпечує захист з певною надійністю від блискавок, параметри яких знаходяться у певних діапазонах. СБЗ певного класу реалізується за відповідними вимогами (перерізи провідників, відстані, мінімальні розміри електродів систем заземлення, роздільні відстані та ін.).

Очікувану кількість уражень об'єкта блискавкою за рік N можна визначити 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:

$$N = [S \cdot L + 2 \cdot (3 \cdot h_{об}) \cdot (S + L) + \pi \cdot (3 h_{об})^2] \cdot n \cdot 10^{-6}; \quad (6.2a)$$

або еквівалентна їй формула:

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

- 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, $1/(\text{км}^2 \cdot \text{рік})$. Якщо дані спостережень відсутні n може бути приблизно розраховано за формулою

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

де T_{gp} – середня тривалість гроз у годинах, визначена за картами інтенсивності грозової діяльності (наприклад, Додаток Б [11]) 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 у формулах (6.2а) та (6.2б) розглядається ширина і довжина найменшого прямокутника, в який може бути вписана будівля або споруда в плані.

В стандарті [12] передбачено можливість врахування різних інших факторів, що впливають на кількість очікуваних уражень об'єкта: рельєф місцевості, оточення споруди іншими об'єктами, складну структуру споруди та ін.

Для кожного РБЗ (I, II, III, IV) встановлено граничні параметри струму блискавки, в т.ч. максимальні (табл. 6.1 ... 6.5) і мінімальні (табл. 6.6) значення амплітуди струму.

Таблиця 6.1. Максимальні параметри першого імпульсу струму блискавки (позитивного, за [12])

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. Максимальні параметри першого негативного імпульсу струму блискавки ([12])

Параметр струму	РБЗ		
	I	II	III
Максимум струму I , кА	100	75	50
Тривалість фронту T_1 , мкс	1	1	1
Час напівспаду T_2 , мкс	200	200	200
Середня крутість a , кА/мкс	100	75	50

Таблиця 6.3. Максимальні параметри наступного імпульсу струму блискавки (негативного, за [12])

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 6.4. Максимальні параметри тривалого струму блискавки ([12])

Параметр струму	РБЗ		
	I	II	III, IV
Заряд тривалого струму Q_L , Кл	200	150	100
Тривалість струму T_L , с	0,5		

Таблиця 6.5. Максимальні параметри розряду блискавки ([12])

Параметр струму	РБЗ		
	I	II	III, IV
Заряд розряду блискавки Q_F , Кл	300	225	150

Таблиця 6.6. Мінімальні параметри струму блискавки і радіуси фіктивної сфери для прийнятих РБЗ [11, 12]

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

Максимальні значення параметрів струму блискавки використовуються для розрахунків перерізу провідників (табл. 6.7 [11]); товщини металевої 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 використовують для встановлення

радіуса фіктивної сфери («сфери, що котиться», табл. 6.6), за допомогою якої може проводитися розрахунок блискавкоприймачів (об'єму захисту) і визначатися зони захисту від дії блискавок ($0_A, 0_B, I, \dots$).

Характеристики перерізів ключових компонентів системи зовнішнього БЗ (блискавкоприймачів, струмовідводів, заземлювачів), згідно [11] та [12], наведено у табл. 6.7 та 6.8, відповідно.

Таблиця 6.7. Матеріал і мінімальні перерізи елементів зовнішньої системи блискавкозахисту [11]

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 умов підвищеної корозії або механічних дій.

Таблиця 6.8. Матеріал і мінімальні перерізи елементів зовнішньої системи блискавкозахисту (деякі приклади) [12]

Рівень захисту	Матеріал	Переріз, мм ²		
		блискавкоприймача	струмовідводу (у повітрі)	заземлювача (круглий стрижень/провідник)
I-IV	Сталь з гарячим оцинкуванням	50	50	154/78
I-IV	Сталь, вкрита міддю	50	50	154/50
I-IV	Нержавіюча сталь	50	50	176/78
I-IV	Алюміній (смуга/круг)	70/50	50	Не застосовується
I-IV	Мідь	50	50	176/50

Примітка. Вказані значення можуть бути збільшені в залежності від умов підвищеної корозії або необхідності додаткового врахування термічних або механічних дій.

Згідно [11], 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.

Згідно [12], задаються ймовірності меж очікуваних параметрів струмів блискавок для кожного РБЗ (табл. 6.9). Відповідні значення у [11] та [12] є зіставними.

Таблиця 6.9 Ймовірності меж параметрів струмів блискавок [12]

Ймовірність того, що параметри струмів блискавок	РБЗ			
	I	II	III	IV
- є меншими за максимальні значення у табл. 6.1...6.5	0,99	0,98	0,95	0,95
- є більшими за мінімальні значення у табл. 6.6	0,99	0,97	0,91	0,84

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

Згідно [12], визначення захищених об'ємів рекомендують здійснювати за методами захисного кута, фіктивної сфери і захисної сітки. Згідно ж [11], як основні, рекомендовано застосувати таблиці, які, як згадувалося, враховують ймовірнісні моделі, а також перелічені методи (кута, сфери, сітки). Хоча щодо застосування у [11] останніх висловлено невиправдані обмеження.

В табл. 6.10 для СБЗ класів I–IV наводяться значення кутів при вершині/грані захищеного об'єму, радіуси фіктивної сфери, а також максимальні гранично допустимі кроки чарунки сітки. Визначення значення захисного кута для різних висот блискавкоприймачів h виконують за допомогою графіків на рис. 6.2.

Таблиця 6.10. Параметри для розрахунку захищеного об'єму, утвореного блискавкоприймачами, за методами захисного кута, фіктивної сфери і захисної сітки [12]

Клас СБЗ	Радіус фіктивної сфери R , м	Кут α° , при вершині блискавководводу для його різної висоти h , м				Крок чарунки сітки, м
		20	30	45	60	
I	20	25	*	*	*	5x5
II	30	35	25	*	*	10x10
III	45	45	35	25	*	15x15
IV	60	55	45	35	25	20x20

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

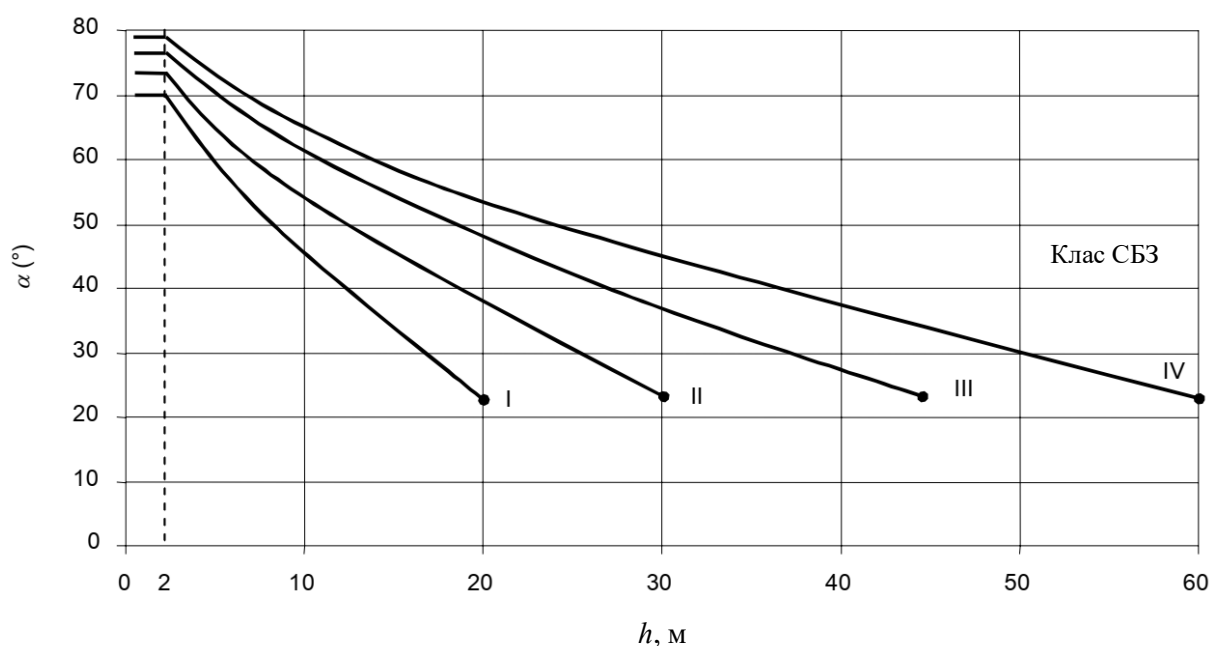


Рис. 6.2 Визначення захисних кутів для чотирьох класів СБЗ [12]

При застосуванні методу захисного кута стрижневі блискавкоприймачі, щогли і триси розміщують так, щоб всі частини споруди знаходилися в зоні захисту, утвореній під кутом α до вертикалі. Метод захисного кута не використовують, якщо висота блискавкоприймача h більша, ніж радіус фіктивної сфери, визначений за табл. 6.6 та 6.10 для відповідного рівня захисту.

Метод фіктивної сфери звичайно використовують для визначення зони захисту блискавковідводів частини або ділянок споруди, коли згідно з табл. 6.10 виключена можливість 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. Для чотирьох класів СБЗ, значення фіктивного радіусу подано у табл. 6.6 та 6.10. Величина цього радіусу R (м) пов'язана із величиною заряду у каналі i , остаточно, струму зворотного удару I (кА) блискавки наступним співвідношенням:

$$R = 10 \cdot I^{0.65} \quad (6.5)$$

Приклади визначення захищених об'єктів за методом фіктивної сфери (сфери, що котиться) на складній споруді показано на рис. 6.3.

Одинарний стрижневий блискавковідвід

Згідно з [11] (Додаток В), стандартним захищеним об'ємом одиничного стрижневого блискавковідводу висотою h є круговий конус висотою $h_o < h$, вершина якого співпадає з вертикальною віссю блискавковідводу, рис. 6.4. Габарити зони визначаються двома параметрами: висотою конуса h_o і радіусом конуса на рівні землі r_o . Наведені нижче розрахункові формули (табл. 6.11) придатні для блискавковідводів висотою до 150 м. При більш високих блискавковідводах слід користуватися спеціальною методикою розрахунку.

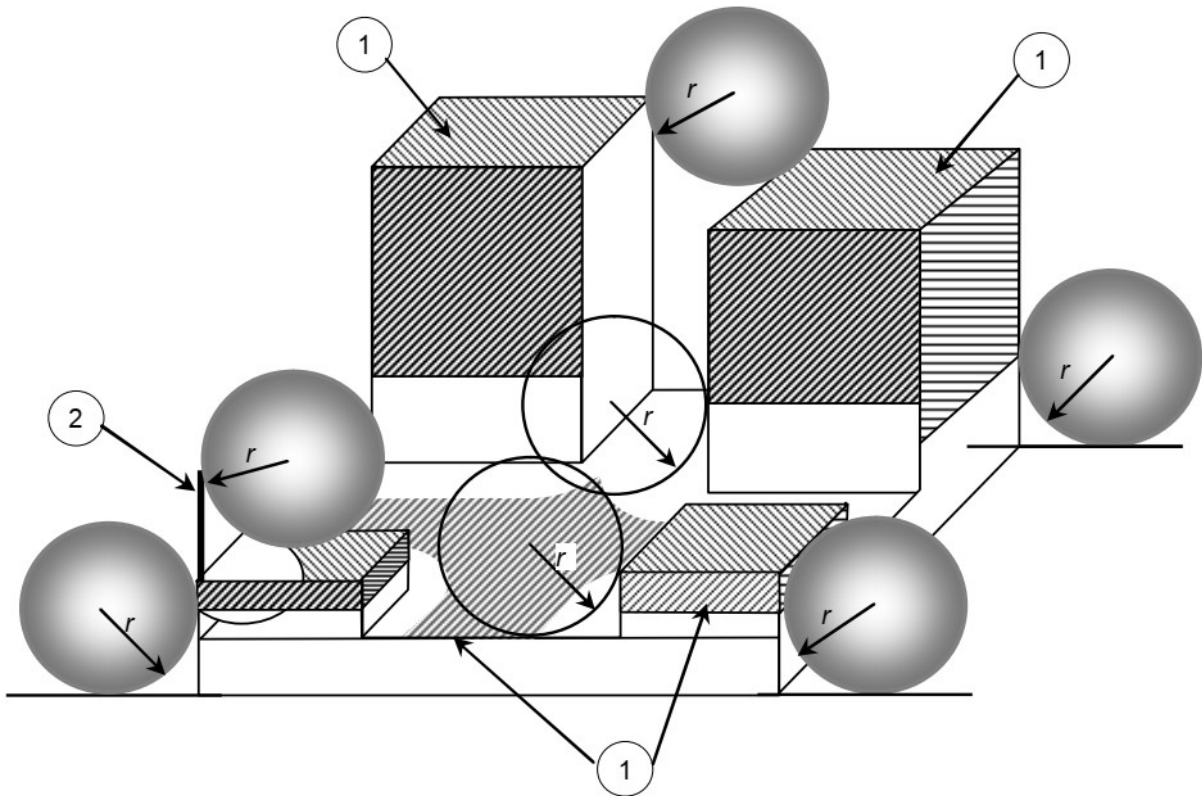


Рис. 6.3. Приклади визначення захищених об'ємів за методом фіктивної сфери на складній споруді [12]:

1 – заштриховані зони можуть бути уражені блискавкою і потребують влаштування захисту, згідно табл. 6.9; 2 – щогла на споруді; $r = R$ – радіус фіктивної сфери, згідно табл. 6.10

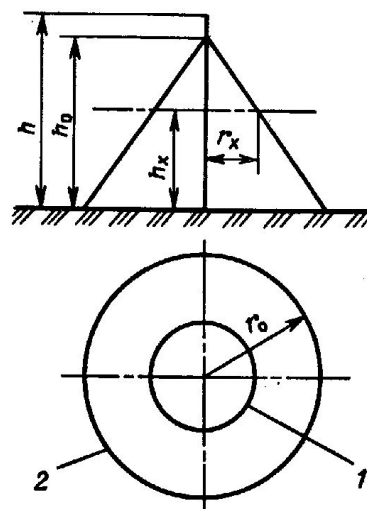


Рис. 6.4. Захищений об'єм одинарного стрижневого блискавковідводу [11]:

1 – границя об'єму захисту на рівні h_x ; 2 – те саме на рівні землі

Таблиця 6.11. Розрахунок розмірів об'єму захисту одиничного стрижневого блискавковідводу за [11]

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	$[0,65 - 10^{-3}(h - 100)]h$	$[0,5 - 2 \cdot 10^{-3} (h - 100)]h$

Інколи визначають ще одну характеристику захищеного об'єму – так звану *активну висоту* блискавковідводу:

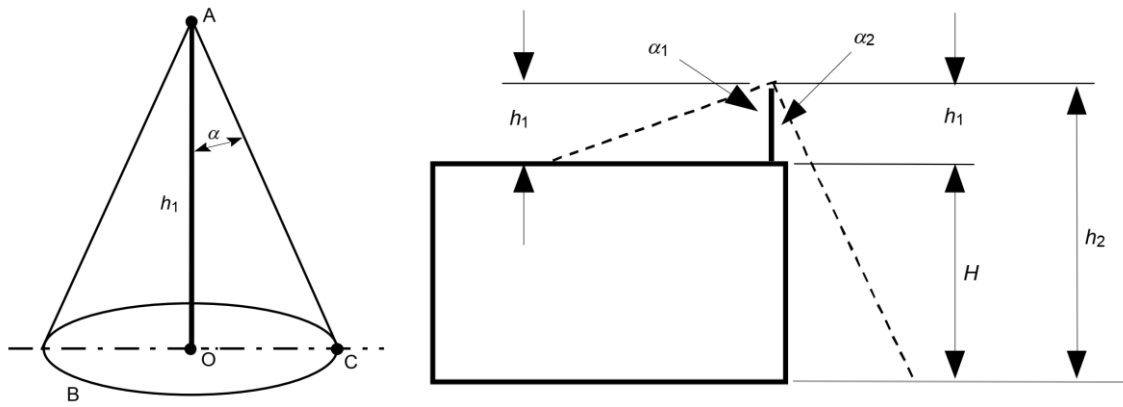
$$h_a = h - h_x . \quad (6.6)$$

Для захищеного об'єму з необхідною надійністю одиничного стрижневого блискавковідводу радіус горизонтального перерізу r_x на висоті h_x визначають за формулою:

$$r_x = \frac{r_0(h_0 - h_x)}{h_0} . \quad (6.7)$$

Згідно з [12], захищений об'єм для одинарного стрижня необхідно визначати за методом захисного кута (рис. 6.2 та 6.5, табл. 6.10) або сфери, що котиться (рис. 6.3, табл. 6.10). Слід пам'ятати, що метод захисного кута має обмежене застосування – лише до певних висот стрижня для кожного класу СБЗ.

Приклади визначення захищених об'ємів за методом захисного кута для блискавкоприймачів у вигляді одинарного стрижня показано на рис. 6.5.



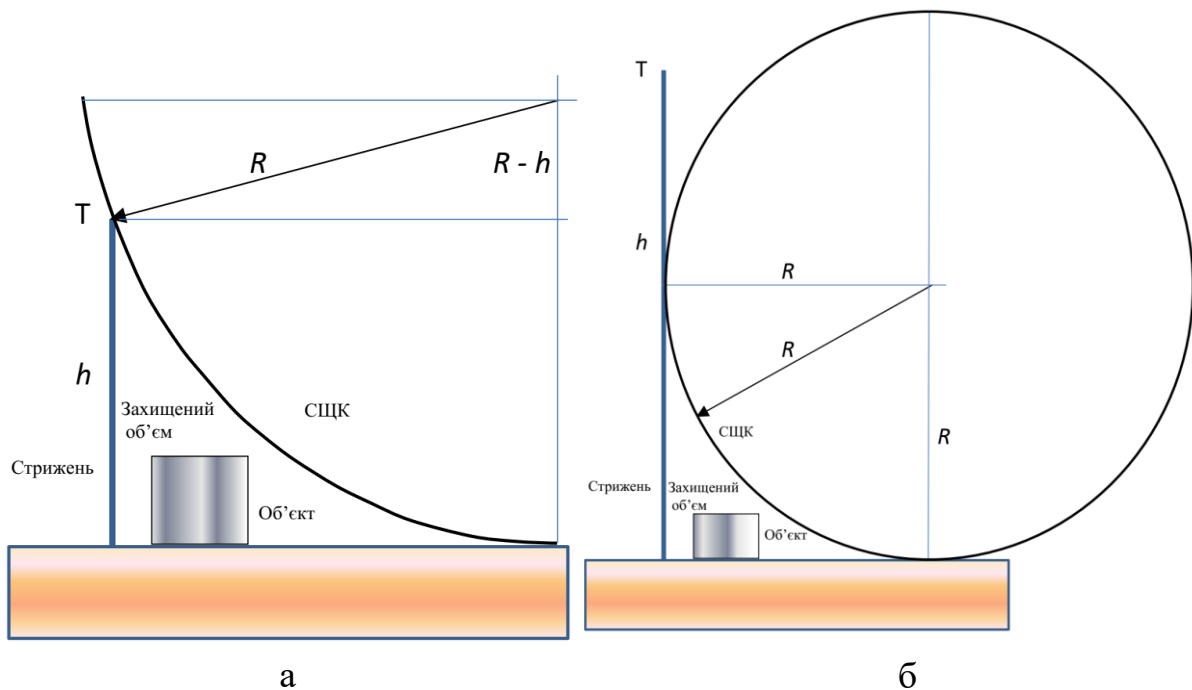
а

б

Рис. 6.5. Приклади визначення захищених об'ємів за методом захисних кутів для одинарних стрижневих блискавкоприймачів ($h = h_1$) [12]:

а – стрижень встановлено на рівні землі; б – стрижень на споруді

Приклади визначення захищеного об'єму, що утворюється одинарним стрижневим блискавкоприймачем наведено на рис. 6.6.



а

б

Рис. 6.6. Приклади визначення захищеного об'єму за методом сфери, що котиться, для одинарного стрижневого блискавкоприймача:

а – $h < R$; б – $h \geq R$

Два стрижневих блискавковідводи

Згідно [11], 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. 6.7 (відповідно до Додатка Д [11]).

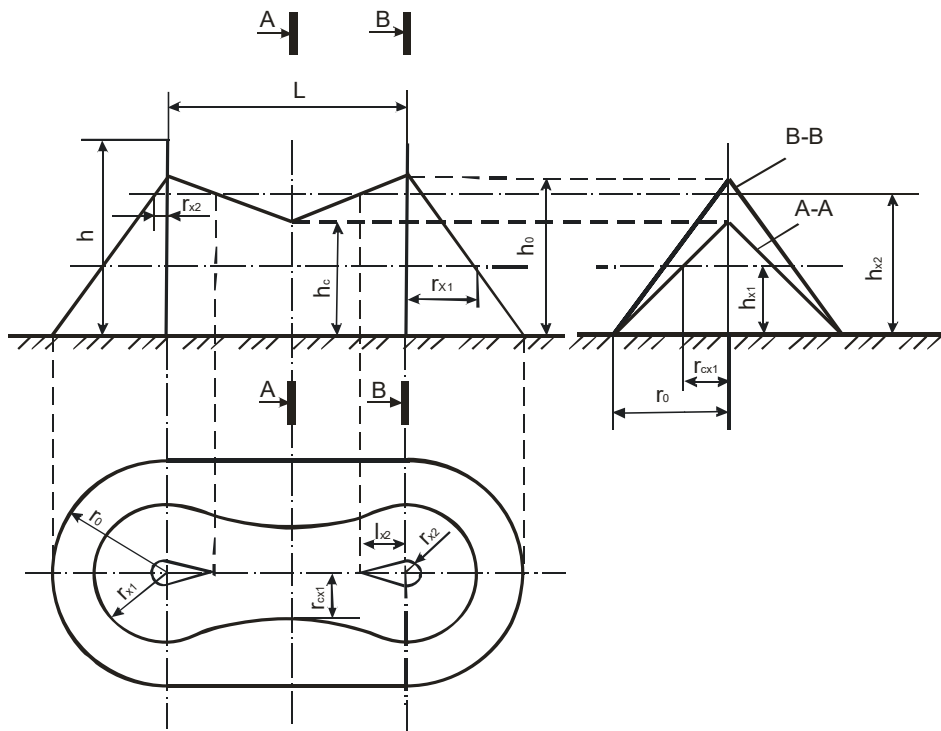


Рис. 6.7. Зона захисту подвійного стрижневого блискавковідводу [11]

На рис. 6.7 прийнято позначення:

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 ($r_{cx} = b_x/2$).

Побудова зовнішніх областей зон подвійного блискавковідводу (напівконусів з габаритами h_o, r_o) виконується за формулами табл. 6.11 для одиничних стрижневих блискавковідводів. Розміри внутрішніх областей визначаються параметрами h_o 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 між стрижнями не має провисання ($h_c = h_o$). Для відстаней $L_c \leq L \leq L_{max}$ висота h_c визначається за формулою

$$h_c = \frac{L_{max} - L}{L_{max} - L_c} h_o. \quad (6.8)$$

Граничні відстані L_{max} і L_c обчислюються за емпіричними формулами табл. 6.12, які можна застосовувати для блискавковідводів висотою до 150 м. При більшій висоті блискавковідводів слід користуватися спеціальними методиками.

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 (6.7);

– довжина горизонтального перерізу l_x на висоті $h_x \geq h_c$:

$$l_x = \frac{L(h_o - h_x)}{2(h_o - h_c)}, \quad (6.9)$$

при $h_x < h_c$:

$$l_x = L / 2; \quad (6.10)$$

– ширина горизонтального перерізу в центрі між блискавковідводами становить $2r_{cx}$ на висоті $h_x \leq h_c$ і визначається через r_{cx} :

$$r_{cx} = \frac{r_0(h_c - h_x)}{h_c}. \quad (6.11)$$

Таблиця 6.12 Розрахунок параметрів зони захисту подвійного стрижневого блискавковідводу [11]

Надійність захисту P_3	Висота блискавковідводу 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	$[4,75 - 3,57 \cdot 10^{-3}(h - 30)] h$	$[2,25 - 0,01007(h - 30)] h$
	від 100 до 150	$4,5h$	$1,5h$
0,999	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	$4,0h$	$1,5h$

Згідно [12], захищений об'єм СБЗ, що складається з кількох стрижнів, визначається як звичайна сума захисних об'ємів всіх окремих стрижнів. Це стосується і двох, і трьох, і будь-якої їхньої кількості. Тому необхідно просто застосовувати описані вище методики (захисний кут, фіктивна сфера) для одинарних стрижнів і будувати результуючий захисний об'єм.

Експериментальна установка

У якості джерела, що імітує розряд блискавки, у 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. 6.8) складається з чотирьох конденсаторних ступенів, кожна з яких містить по два послідовно з'єднаних конденсатори, зарядних опорів R_0 , чотирьох іскрових проміжків і зарядного пристрою.

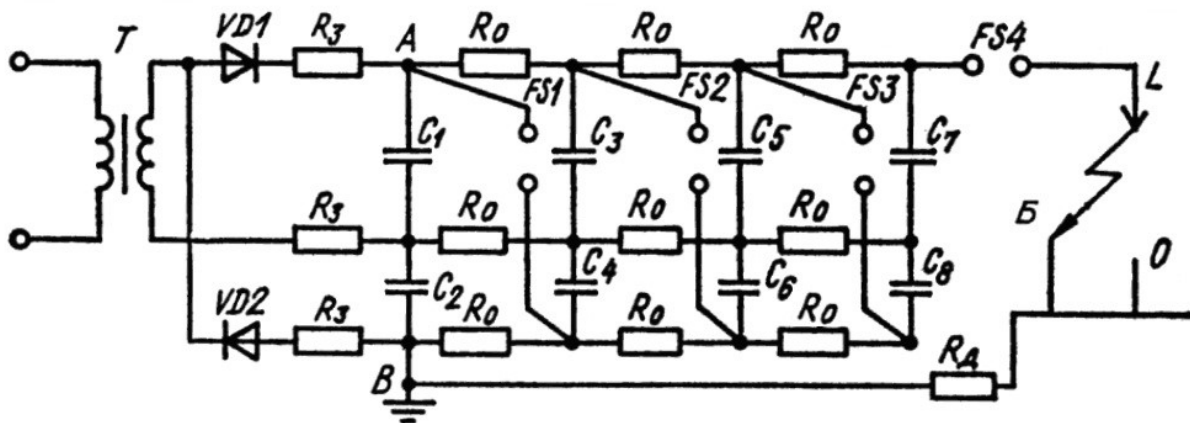


Рис. 6.8. Схема стенду для визначення захисної дії блискавковідводів

Зарядний пристрій – джерело випрямленої напруги – зібрано за схемою подвоєння напруги на базі високовольтного трансформатора T , двох збірок твердотільних діодів $VD1$ 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} може досягати 125 кВ, а допустима напруга для кожного з двох конденсаторів на одному ступені становить 70 кВ.

На другому етапі внаслідок практично одночасного пробою 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 пробою 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. Грозовий імпульс напруги на виході ГІН має тривалість фронту близько 1 мкс. Додаткові деталі щодо ГІН описано у лабораторній роботі № 3.

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 у цій роботі використовують вертикальні заокруглені на кінчику металеві стрижні з діаметром 2 мм (на провідних підставках), які мають висоту: 120, 80, 60, 40 та 20 мм.

Методика виконання роботи та завдання

1. Ознайомитися з методикою роботи на високовольтному стенді та з ГІН.
2. Ознайомитися з правилами техніки безпеки роботи на стенді.
3. Визначити геометричний масштаб моделювання і виставити електрод «лідер L» відносно стола з моделями блискавкоприймачів та об'єктів.
4. Визначити захищений об'єм для одинарного стрижневого блискавковідводу ($h = 120$ мм) із застосуванням почергово моделей об'єктів різної висоти ($h_x = 80, 60, 40$ та 20 мм) за десятиударною методикою або двадцятиударною методикою для ймовірності прориву

блискавки на об'єкт $\psi = 10\%$. Блискавковідвід 1 (рис. 6.9) 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 мінімально наближають блискавковідвід (на 0,5-1 см) до проєкції лідера, щоби всі 10 розрядів проходили у блискавковідвід. Далі за допомогою моделей об'єктів 2 знаходять їх розташування на границі зони з 90%-ю надійністю захисту між блискавковідводом та проєкцією лідера, яке відповідає прориву одного з десяти розрядів на об'єкт. Дані розрахунків та експериментів занести в табл. 6.13.

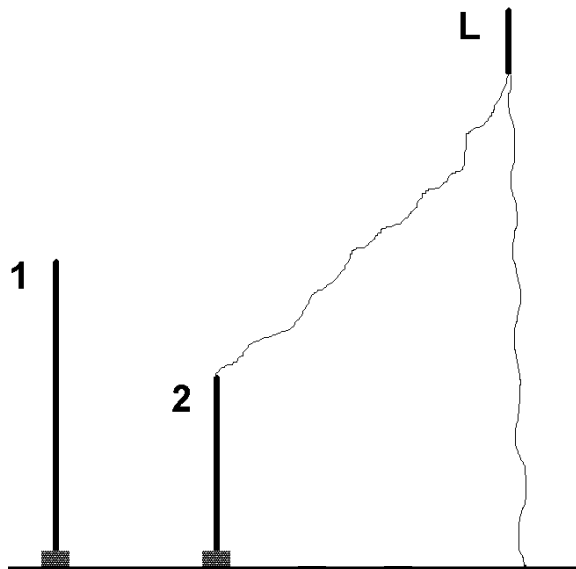


Рис. 6.9. Визначення зони захисту одинарного стрижневого блискавковідводу:

1 – блискавковідвід (Б);

2 – об'єкт (О);

L – електрод, який моделює первинний лідер

5. Визначити зону захисту для двох блискавковідводів за умови $\psi = 10\%$. Їх розміщують симетрично відносно точки проєкції 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 проєкції лідера. Досліди виконати щонайменше для трьох значень відстаней між

двома стрижневими блискавковідводами, які задовольняють умови: $L < h$; $h < L < 6h$; $L > 6h$. Дані занести в табл. 6.14.

Таблиця 6.13. Визначення характеристик захищеного об'єму
одинарного стрижневого блискавковідводу

Висота об'єкта, h_x , см		8	6	4	2	0
Радіус r_x об'єму захисту, см	Розрахунок за формулами з табл. 6.11, згідно [11]					
	Розрахунок за [11, 12] методом: - сфери - кута					
	Дослід					

Таблиця 6.14. Визначення характеристик захищеного об'єму
подвійного стрижневого блискавковідводу

$L = \dots$ см

Висота об'єкта, h_x , см		8	6	4	2	0
Півширина $r_{cx} = b_x/2$ об'єму захисту, см	Розрахунок за формулами з табл. 6.12, згідно [11]					
	Розрахунок за [11, 12] методом: - сфери* - кута					
	Дослід					

*Примітка: Для розрахунків і побудови захисних об'ємів подвійного стрижневого блискавковідводу за методом фіктивної сфери потрібно вирішити відповідну стереометричну задачу (цей пункт роботи є факультативним)

6. Виконати розрахунки характеристик захищеного об'єму стрижневих блискавковідводів за формулами з [11] та за методами сфери і кута (коли це можливо), згідно [11, 12].

7. Описати отримані результати розрахунків та модельних експериментів. Побудувати графічно захищені об'єми для досліджених ситуацій. Порівняти та зробити висновки.

Техніка безпеки

Роботу виконують згідно правил техніки безпеки у високовольтних лабораторіях на кафедрі теоретичної електротехніки. 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. щодо виставлення 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 захищений об'єм одинарного стрижневого блискавковідводу?
2. Як визначають захищений об'єм 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 захищених об'ємів 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 захищених об'ємів блискавковідводів на моделях?

Додаткові запитання

1. Як визначається захищені об'єми блискавкозахисту споруд за методом «радіусу сфери, що котиться»?

2. Як визначають захищені об'єми за «захисними кутами» (згідно МЕК)? Наведіть та охарактеризуйте залежності для куту захисту тросів ЛЕП.

3. Як захищати від блискавок високі споруди? Як розраховувати захищені об'єми 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 захищений об'єм трьох блискавковідводів?

Лабораторна робота № 7

7. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ У ПОВІТРІ ПРИ ПОНИЖЕНОМУ ТИСКУ

з дисципліни «Техніка та електрофізика високих напруг»

(4 академічні години)

Мета і зміст роботи

Мета – експериментальне дослідження характеристик тліючого розряду в повітрі при пониженому тиску в спеціальній розрядній трубці та порівняння отриманих результатів з наведеними в технічній літературі.

Зміст – дослідження при різних тисках структури розряду, вольт-амперної характеристики, напруги запалювання та її залежності від добутку тиску на відстань між електродами, щільності струму, залежності ширини темного фарадеєвого простору від тиску.

Теоретичні основи

Загальна характеристика тліючого розряду

Тліючий розряд – це *самопідтримний* розряд з *холодним катодом*. Нові електрони утворюються в ньому переважно в результаті вторинної емісії, головним чином під дією позитивних іонів. Його характерною ознакою є існування поблизу катода шару певної товщини із значним позитивним об'ємним зарядом, сильним полем біля поверхні й значним падінням потенціалу 100-400 В (і більше). Воно називається *катодним падінням*. Товщина шару катодного падіння обернено пропорційна щільності (тиску) газу. Якщо міжелектродна відстань досить велика, між *катодним шаром* й анодом утвориться електронейтральна плазмова область, де поле відносно невелике. Серединну однорідну частину її називають *позитивним стовпом*. Від анода він відокремлюється *анодним*

шаром. Позитивний стовп тліючого розряду постійного струму – яскраво виражений і розповсюджений приклад *слабкоіонізованої неврівноваженої плазми*, що підтримується електричним полем. На відміну від катодного шару, без якого тліючий розряд існувати не може, позитивний стовп не є його невід'ємною частиною. Якщо в результаті утворення катодного шару проміжок між електродами виявляється вичерпаним, стовпа немає. Але якщо не вистачає відстані на формування належного катодного шару, тліючий розряд не загоряється.

Тліючий розряд – один з найбільш вивчених і широко застосовуваних на практиці типів газового розряду. Протягом багатьох десятиліть для його одержання й дослідження служив класичний прилад – *розрядна трубка*. Для тліючого розряду в трубках з радіусом $R \sim 1$ см, довжиною $L \sim 10 - 100$ см при типових тисках $p \sim 10^{-2} - 10^2$ тор характерні напруги на електродах становлять $V \sim 10^2 - 10^3$ В і струми – $i \sim 10^{-4} - 10^{-1}$ А.

Картина світіння

Тліючому розряду властиво певне чергування темних і світлих шарів, які одержали свої спеціальні назви. Спостерігати цю картину добре при низьких тисках (p), коли шари розтягнуті по довжині трубки. Всі процеси у розряді пов'язані із зіткненнями. Відстані характерних точок від катода визначаються числом довжин пробігу електронів $l \sim p^{-1}$, що укладаються на них. Координаті границі якогось шару x_l відповідає певне значення px_l . Шарувата картина розтягується на сантиметри при тисках $p \sim 10^{-1}$ тор. Вона схематично зображена у верхній частині рис. 7.1.

До катода прилягає дуже вузький *астоновий темний простір*. Потім слідує тонкий шар *катодного світіння*. Після нього йде *темний катодний простір*. Наступна за ним область *негативного світіння* різко відділена від темного катодного простору. У напрямку анода негативне світіння загасає й переходить у *темний фарадеевий простір*. За ним починається *світлий*

позитивний стовп. Позитивний стовп іноді має правильну шарувату структуру – це так звані *страти*. Коли їх немає, позитивний стовп світиться досить однорідно аж до анодної області. Там він іноді змінюється невеликим *темним анодним простором*, а біля поверхні анода можна спостерігати вузьку зону *анодного світіння*.

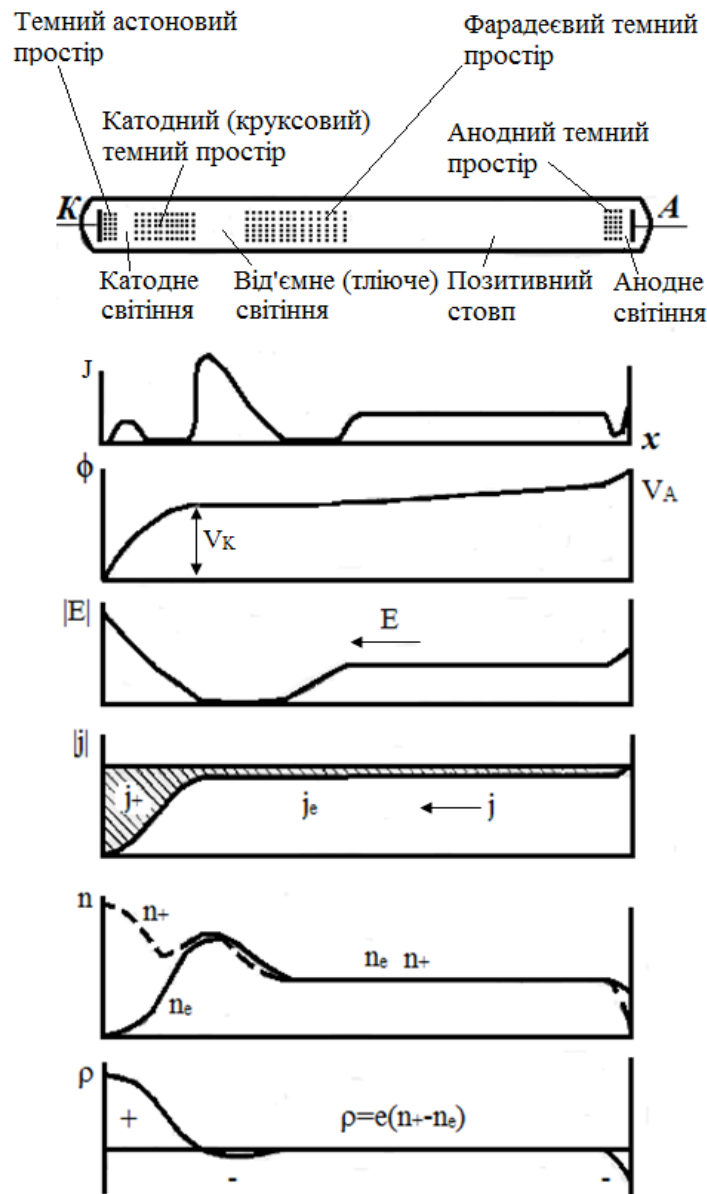


Рис. 7.1. Картина гліючого розряду в трубі й розподілу інтенсивності світіння J , потенціалу ϕ , поздовжнього поля E , густин електронного й іонного струмів j_e, j_+ , зарядів n_e, n_+ та об'ємного заряду $\rho = e(n_+ - n_e)$ [20]

При низьких тисках ($p \sim 10^{-2} \text{ тор}$) і не занадто великих відстанях між електродами для позитивного стовпа місця немає й видна в основному область негативного (*тліючого*) світіння. Від її розряд й одержав свою назву *тліючий* (glow discharge, die Glimmentladung). Позитивний стовп звичайно менш яскравий, ніж негативне світіння, і має інші кольори. У гелії катодне світіння червоне, негативне світіння зелене, позитивний стовп червоно-фіолетовий; у неоні відповідно жовте, жовтогаряче, червоне; в азоті рожеве, блакитне, червоне (такі кольори можемо спостерігати і для повітря). Кожен газ має своє забарвлення, що пов'язано з особливостями спектрів, і це використовується в кольорових рекламних трубках. У довгих трубках при не надмірно низьких тисках звичайно бачимо в основному позитивний стовп. У дуже широких трубках або сферичних посудинах позитивний стовп часто не видно.

При підвищенні тиску всі шари стискаються й стягуються до катода. При $p \sim 100 \text{ тор}$ здається, начебто горить сам катод, хоча це – негативне (тліюче) світіння газу. Розрізняється більш протяжний фарадеевий темний простір, вся інша частина трубки або каналу зайнята позитивним стовпом. При підвищених тисках стовп стискається до осі, при невеликих – дифузійно заповнює перетин трубки.

Розподіл параметрів по довжині

З розташуванням шарів і розподілом яскравості світіння по довжині трубки на рис. 7.1 зіставлені розподіли основних параметрів розряду: повздовжнього електричного поля $E = E_x$, потенціалу φ ; густин: електронів n_e , позитивних іонів n_+ , щільності струмів j_e , j_+ , об'ємного заряду $\rho = e(n_+ - n_e)$. Картина ця – якісна, але в достатній мірі достовірна. Вона підтверджується зондовими вимірами й теоретичними міркуваннями. Один з найголовніших моментів у ній – великий *просторовий заряд* і

сильне поле поблизу катода, що майже лінійно спадає до дуже малої величини біля катодної границі негативного світіння. Ця область називається *катодним шаром*, але вже не по такій зовнішній ознаці, як світіння, а по «об'єктивним» показникам – розподілу електричного поля.

Далі йде зона дуже слабкого поля; воно іноді буває навіть злегка негативним, тобто спрямованим до анода. У фарадеевому просторі поздовжнє поле зростає й потім залишається постійним протягом позитивного стовпа.

Останній може бути як завгодно довгим, аби тільки вистачало напруги джерела живлення, щоб забезпечити належну різницю потенціалів у стовпі. Сталість осьового градієнта потенціалу у стовпі, перевірена зондовими вимірами, свідчить про *електронейтральність плазми*. Біля анода є область невеликого *анодного падіння потенціалу*.

Якісна інтерпретація картини світіння

З катода електрони вилітають із енергією порядку 1 еВ. Вони не в змозі збуджувати атоми. Так з'являється темний астоновий простір. Прискорюючись у полі, електрони набувають енергію, достатню для збудження, тоді виникає катодне світіння. З'являються навіть два-три шари катодного світіння. Вони відповідають збудженню різних рівнів атомів, ближче до катода – нижчих, далі – більш високих. Кольори таких шарів різні. Потім енергія електронів, що прискорюються, перевищує *максимуми функцій збудження*, де перетини взаємодії падають. Електрони перестають збуджувати атоми – утворюється темний катодний простір. Тут електрони переважно іонізують атоми й відбувається основне їхнє розмноження. Іони, що народжуються, рухаються у полі набагато повільніше, і у цій зоні накопичується великий позитивний об'ємний заряд. Струм переноситься в основному іонами.

До кінця катодного шару народжується великий потік електронів, причому, у силу лавиноподібного характеру розмноження, більшість електронів народжується саме наприкінці шару, де поле вже не настільки сильне й слабшає. Енергії цих електронів не занадто великі й перебувають в області максимумів функцій збудження. З'являється негативне світіння. Якщо поблизу катода енергія електронів наростає в міру віддалення від катода й спочатку з'являються спектральні лінії, що легко збуджуються (перше, і друге катодне світіння), то за катодним шаром енергії електронів, навпроти, зменшуються при віддаленні від катода. У негативному світінні спочатку з'являються ті лінії, які випромінюються з більш високих рівнів атомів, а потім – нижчих, у порядку, зворотному катодному світінню (*правило Зелігера*). У міру того як електрони витрачають свою енергію, акти порушення відбуваються усе рідше й рідше, тому що нової енергії в слабкому полі електрони не здобувають. Негативне світіння переходить у темний фарадеевський простір.

В області негативного світіння є електрони не тільки помірних енергій, хоча їх більшість. Сюди попадають й енергійні електрони, які народилися в глибині катодного шару й у катода й пройшли зону катодного падіння, не зробивши багатьох непружних зіткнень. Вони іонізують атоми, і завдяки цьому за катодним шаром виходить підвищена щільність електронів, більше, ніж у позитивному стовпі.

У фарадеевому просторі поздовжнє поле поступово наростає до значення, властивого позитивному стовпу. У стовпі встановлюється характерний для неврівноваженої слабоіонізованої плазми хаотичний розподіл електронів за швидкостями, у який вносить невелику асиметрію дрейф до анода. Середня енергія електронного спектра в позитивному стовпі становить 1-2 еВ. Але в спектрі є й деяка кількість енергійних електронів. Вони збуджують атоми й обумовлюють світіння стовпа. Анод іони відштовхує, а електрони зі стовпа витягує. Утворюється область

негативного об'ємного заряду й підвищеного поля, що прискорює електрони. Це приводить до анодного світіння.

Направляюча дія зарядів, що осідають на стінках. Досліди свідчать, що розряд може горіти в трубках досить складної конфігурації. Хоча інколи силові лінії прикладеного зовнішнього поля простягаються від анода до катода своїм власним шляхом, заряджені частки рухаються переважно вздовж трубки. Заряди, переважно електрони, на початку процесу захоплені силовою лінією зовнішнього поля до діелектричної стінки, осідають там і накопичуються доти, поки не починають відштовхувати від стінки наступні заряди того ж знаку. Електростатичне поле осілих зарядів, складаючись із зовнішнім, направляє частину силових ліній результуючого поля уздовж доступного для зарядів шляху вздовж трубки. Завдяки цьому ефекту поздовжнє поле в прямій трубці або в плоскому каналі стає більше однорідним. Зазвичай еквіпотенціальні поверхні в трубці опуклі й обернені опуклістю до катода. Іноді можна помітити, що так виглядають страти та границя між позитивним стовпом і темним фарадеевим простором. Границі негативних шарів у плоского катода звичайно плоскі, що, очевидно, свідчить про відсутність тут поперечної складового поля.

Вольт-амперна характеристика розряду між електродами

По досягненні на електродах *пробивної напруги* $V=V_i$ у газі запалюється *самостійний розряд*. У реальному ланцюзі крім розрядного проміжку завжди є омичний опір Ω (спеціально включений, опір проводів, джерела живлення), і це обмежує величину досяжного струму при заданій електрорушійній силі (ЕРС) джерела ε . Оскільки масштаб розрядного струму багато в чому визначає сам тип розряду, тому що з величиною

струму зв'язаний ступінь іонізації газу, від опору Ω залежить, який розряд загориться після пробою.

Навантажувальна пряма. Електричне рівняння замкнутого ланцюга, що включає розрядний проміжок:

$$\varepsilon = V + i\Omega \quad (7.1)$$

На графіку $V(i)$ це рівняння зображується прямою лінією (рис. 7.2, 7.3), яку називають *навантажувальною прямою*. Вона падає тим крутіше, чим більший зовнішній опір, і перетинає вісь абсцис в точці, що відповідає величині граничного струму ε/Ω . Реалізуються ті значення i й V , яким відповідає перетин навантажувальної прямої і ВАХ $V(i)$.

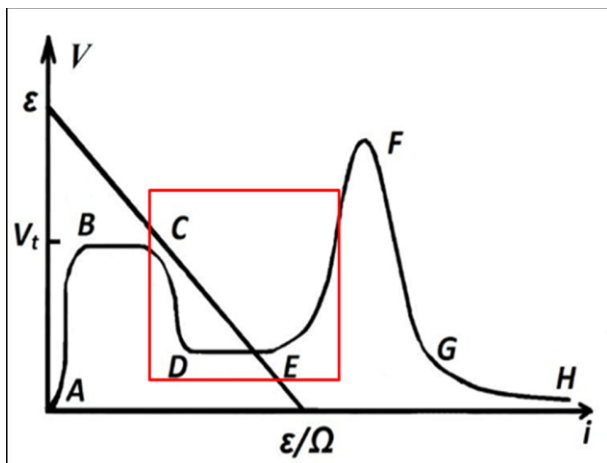


Рис. 7.2. ВАХ розряду між електродами в широкому діапазоні струмів і навантажувальна пряма:

A - область несамостійного розряду, BC - темний таунсендів-ський розряд, DE - нормальний тліючий розряд, EF - аномальний тліючий розряд, FG - перехід у дугу, GH - дуга [20]

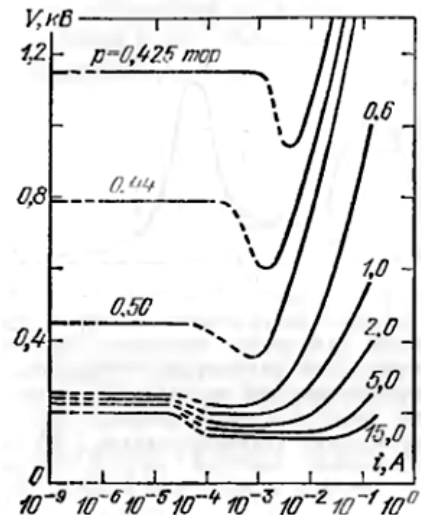


Рис. 7.3. Вимірні ВАХ розряду в неоні між мідними дисками діаметром 9.3 см з відстанню між ними 1.6 см:

плато ліворуч - темний розряд, плато внизу або область мінімуму - нормальний тліючий розряд, підйом праворуч - аномальний тліючий розряд [20]

Темний таунсендівський розряд. Допустимо, що опір Ω настільки великий, що ланцюг у стані пропустити лише винятково слабкий струм. Щільності n_e, n_+ при цьому незначні й просторовий заряд настільки малий, що не спотворює зовнішнього поля. Для підтримки такого самостійного розряду до електродів повинна бути прикладена напруга, яка дорівнює потенціалу запалювання V_t . Саме вона забезпечує стаціонарне відтворення електронів, що вилітають із катода і які витягуються на анод.

Поки поле $E(x)$ не залежить від густин зарядів (від струму), ВАХ розряду є $V(i)=const=V_t$. Цій ситуації відповідає ділянка BC на рис. 7.2 [20]. Такий самостійний розряд спостерігають у звичайних трубках при струмах $i \sim 10^{-10} \dots 10^{-5}$ А. Він називається *темним таунсендовським*. Через надзвичайну малість іонізації газ зовсім не світиться. Струм реєструють високочутливими приладами.

Тліючий розряд. Будемо нарощувати струм. Практично це можна здійснити шляхом зменшення навантажувального опору Ω або збільшення ЕРС джерела ε . Починаючи з якогось струму напруга на електродах падає. Потім падіння припиняється й у досить великому діапазоні струмів (іноді в кілька порядків) майже не змінюється. Ця ділянка DE на ВАХ відповідає так званому *нормальному тліючому розряду*. Нижня частина перехідної ділянки CD відповідає *піднормальному тліючому розряду*.

Нормальний розряд має чудову властивість. При зміні розрядного струму щільність його на катоді залишається незмінною. Міняється площа плями на катоді, в яку тече струм. Міняючи Ω або ε у ту або іншу сторону, можна бачити, як світла *струмова пляма* на поверхні катода розширюється або скорочується.

Коли на катоді не залишається вільного місця, для збільшення струму доводиться підвищувати напругу, щоб виривати з одиниці площі

катода більше електронів. Адже тепер повинна рости щільність катодного струму. Такий розряд називається *аномальним тліючим*. Йому відповідає наростаюча ділянка *EF* ВАХ. При переході до аномального режиму тліюче світіння охоплює спочатку всю поверхню катода, звернену до анода, потім відшукує будь-яке не захищене діелектриком місце на бічній та внутрішній сторонах, на ніжці й лише коли все вичерпано, стає більше протяжним і насиченим, що властиво аномальному розряду. При $i \sim 1$ А тліючий розряд зривається в дугу. Ділянка *FG* описує перехід до дуги, ділянка *GH* – дуговий розряд.

На рис. 7.3 показано експериментальні ВАХ [20]. Досліджувався розряд у неоні в широкій трубці з мідними дисковими електродами діаметром 9,3 см; відстань між ними – 1,6 см. Охоплено темний, нормальний і частково – аномальний режими. Чим вище тиск, тим ширше діапазон струмів, у якому здійснюється нормальний режим. У H_2 , N_2 , Ar спостерігалася приблизно та ж картина, що й в Ne .

Залежність напруги запалювання розряду в газах від добутку тиску та відстані між електродами $U(pd)$

Ця залежність відома для випадку однорідного поля та сталої температури як закон Пашена [5-7, 20]. Вона має характерний *V*-подібний вигляд – рис. 7.4. В даній роботі залежність $U(pd)$ може досліджуватися для певних спеціальних умов – при сталому та відносно великому (300 мм) значенні відстані між електродами.

Одна з можливих апроксимацій залежності $U(pd)$ [6, 7, 20]:

$$U = \frac{Vpd}{\ln[Apd/\ln(1+1/\gamma)]} , \quad (7.2)$$

де α та γ – перший та другий коефіцієнти іонізації (див. роботу № 1).

Значення констант A і B наведено у табл. 7.1 [20].

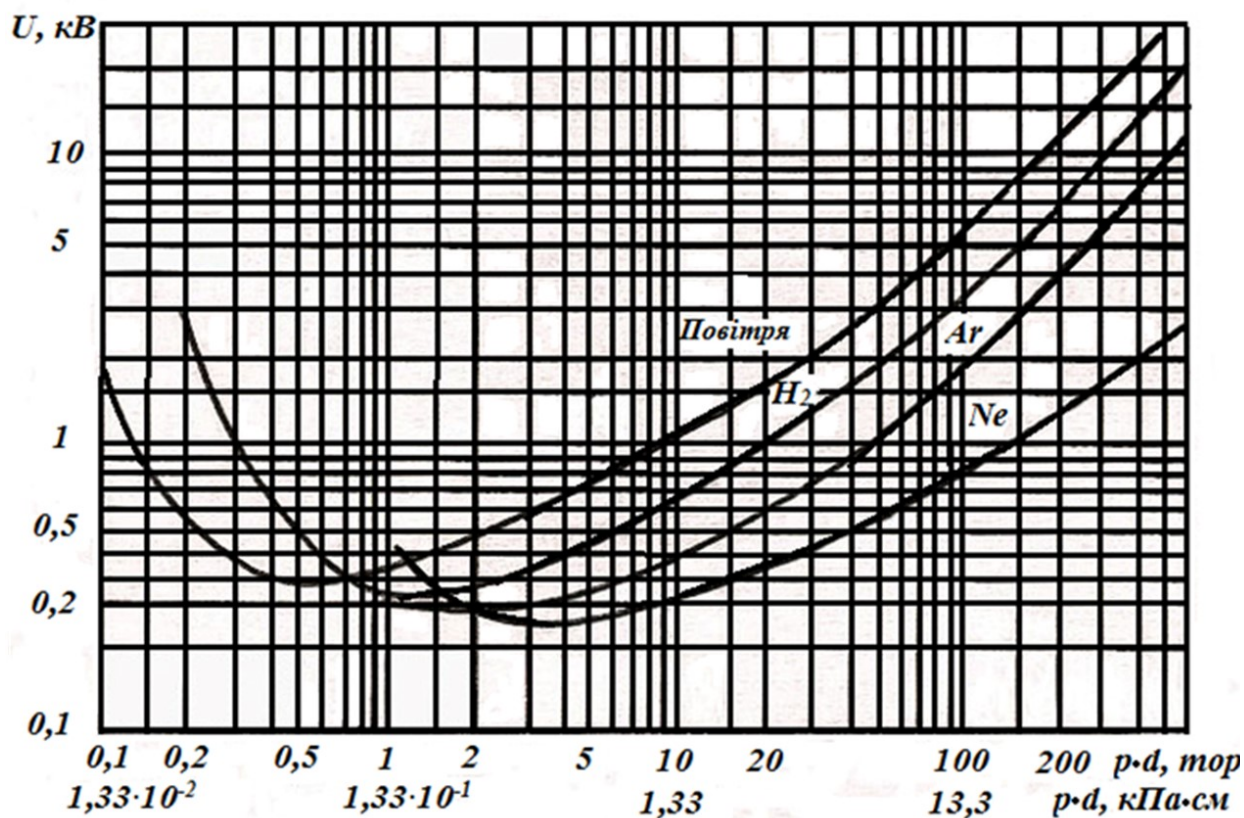


Рис. 7.4. Залежність напруги запалювання розряду в газах від добутку тиску та відстані між електродами [20]

Таблиця 7.1. Коефіцієнти А і В для різних газів [20]

Газ	$E/p,$ $B \cdot (\text{см} \cdot \text{тор})^{-1}$	$A,$ $(\text{см} \cdot \text{тор})^{-1}$	$B,$ $B (\text{см} \cdot \text{тор})^{-1}$
Азот	27-200	8,8	275
	100-600	12	342
Повітря	36-180	8,6	254
	100-800	15	365
Водень	22-1000	5	139
Кисень	70-300	7,7	203,5
Вуглекислий газ	44-150	4,75	182,5
	500-1000	20	466

Розрядна трубка як індикатор стану розрідження

Ширина темного катодного простору змінюється із тиском, оскільки залежить від середньої довжини вільного пробігу електронів. Тому ця

ширина може слугувати мірою тиску у розрядній трубці. Відповідно, цей зв'язок приблизно можна описати виразом [21]

$$p = \frac{C}{d_k}, \quad (7.3)$$

де p – тиск; C – коефіцієнт пропорційності, що залежить від роду газу; d_k – ширина катодного темного простору.

На рис. 7.5 показані криві, отримані за допомогою розрядної трубки для повітря (2) і водню (1). Їхній хід з достатньою точністю підтверджує справедливість рівняння (3).

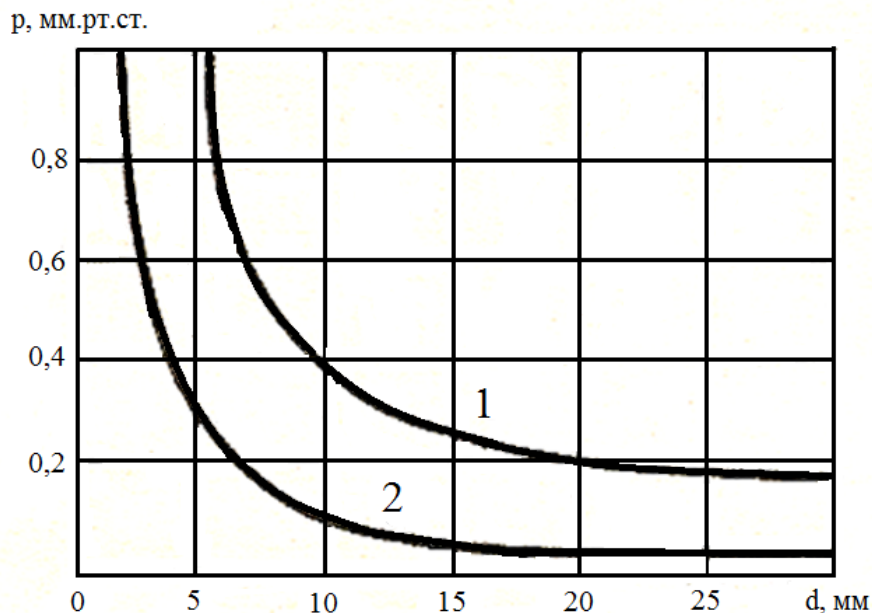


Рис. 7.5. Залежність ширини катодного темного простору від тиску для водню (1) і повітря (2) [21]

При живленні газорозрядної трубки постійною напругою, коли в ній горить самостійний тліючий розряд, розрядний струм I також перебуває в певній залежності від тиску газу. У діапазоні тисків $10^{-1} - 10^{-3}$ мм рт.ст. ця залежність може бути описана рівнянням [21]

$$I = A_p \cdot \ln(p/p_0) \quad (7.4)$$

де A_p – коефіцієнт пропорційності, що залежить від геометричних розмірів трубки й роду газу; p – тиск газу; p_0 – граничне значення тиску газу, при якому виникає самостійний розряд. Таким чином, зв'язок тиску й розрядного струму, який описується рівнянням (7.4), також може бути використано для якісної оцінки стану розрядження.

Експериментальна установка та порядок роботи

Стенд змонтовано на базі вакуумного поста ВОУ-1А і складається з вакуумної системи, системи електропостачання, контрольно-вимірювальних приладів й органів керування (рис. 7.6). В стенді передбачено два робочі вакуумні об'єми для проведення досліджень: розрядна трубка 8 та скляний купол 9 з електродами. Розрядна трубка – для досліджень характеристик тліючого розряду (300 мм), а електроди під куполом – для дослідження закону Пашена в звичайних коротких проміжках (до 4 см). В даній роботі використовується розрядна трубка. Електричне поле створюється в проміжку між алюмінієвими електродами, робочі вакуумні об'єми з'єднано через вакуумну магістраль із форвакуумним насосом ВН-461М (граничний тиск – 10^{-3} мм рт.ст.).

Вимірювання тиску проводиться за допомогою вакуумметрів 10 типів ВІТ-2П; DV-23 та DV-760 (Hastings instruments). Характеристики термопарних ламп вакуумметрів наведено у табл. 7.2. До органів керування вакуумною системою відносять вентилі 12, 13, 14, за допомогою яких з'єднується система з атмосферою, робочий об'єм з виходом форвакуумного насоса та ін. Двигун форвакуумного насоса вмикається тумблером 4 за умови спочатку закритих вентилів 12, 13, 14.

Вакуумну схему стенду наведено на рис. 7.7, а градуювальну характеристику термопарної лампи ПМТ-2 – на рис. 7.8. Вакууметри типу DV-23 та DV-760 мають шкалу безпосередньо в одиницях тиску.

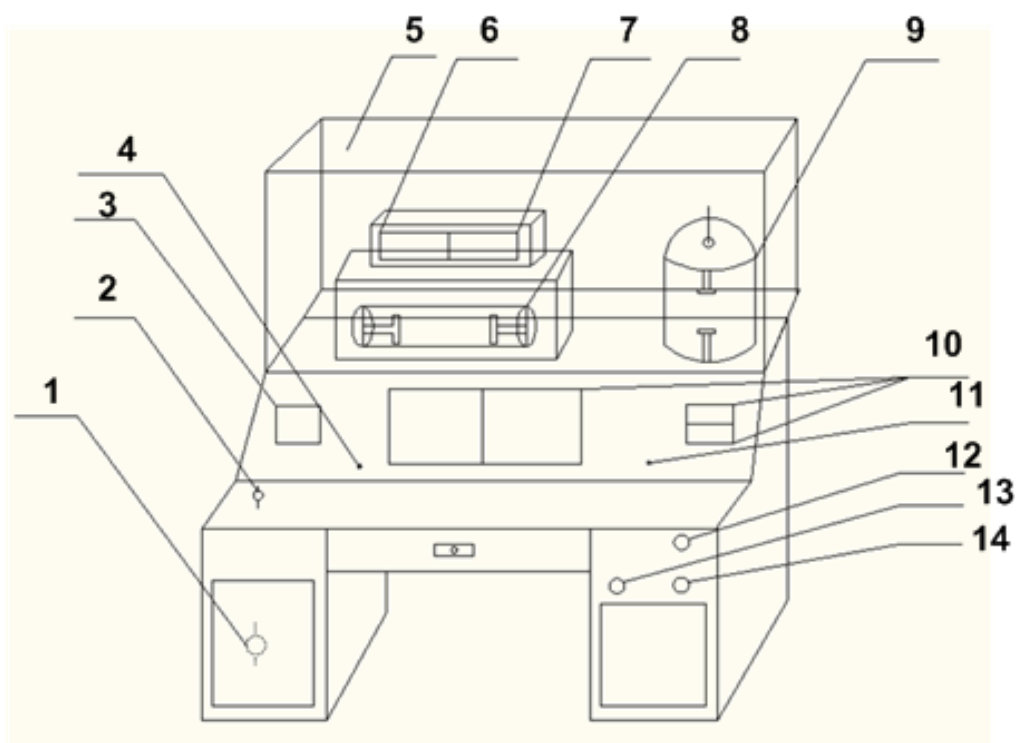


Рис. 7.6. Експериментальна установка [19]:

1 – вимикач мережі; 2 – перемикач S понижуючого трансформатора Т2; 3 – вольтметр; 4 – вимикач форвакуумного насосу; 5 – захисне оргскло; 6 – кіловольтметр; 7 – міліамперметр; 8 – розрядна трубка; 9 – система електродів під скляним ковпаком; 10 – вакуумметри (ВИТ-2П, DV-23, DV-760); 11 – тумблер ВН; 12 – вентиль «повітря в насос/систему»; 13 – вентиль «насос – робочий об’єм»; 14 – вентиль «манометр»

Табл. 7.2. Характеристики термопарних ламп вакуумметрів [19]

Характеристика	ПМТ-2	DV-23	DV-760
Діапазон вимірювання, Торр	$2 \cdot 10^{-1} - 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3} - 1$	1 - 800
Матеріал корпусу	Скло	Метал	Метал

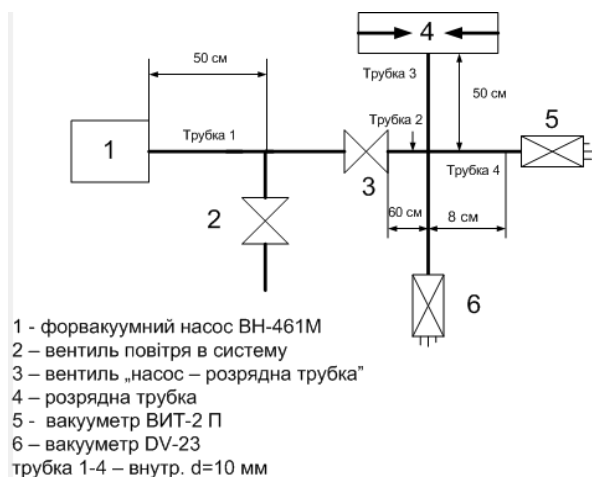


Рис. 7.7. Вакуумна схема стенду

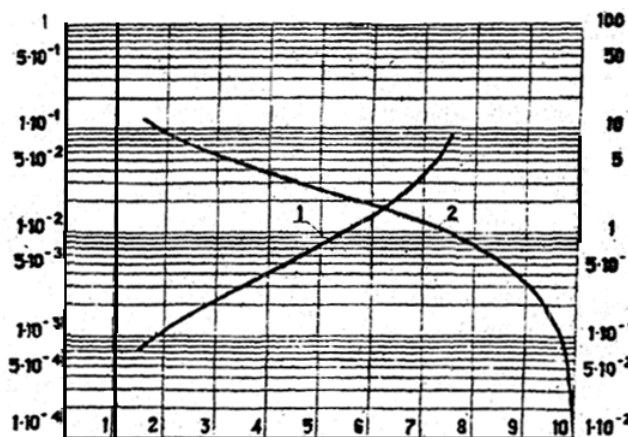


Рис. 7.8. Градувальна крива для термопарної лампи ПМТ-2 (шкали: 1 – права, 2 – ліва)

Після запуску форвакуумного насосу поступово відкривають вентиль 13; регулюванням 13 та 12 виставляють тиск; а вентиль 14 тримають закритим (рис.7.6).

На лицьовій панелі пульта винесено органи керування, які відносяться до електричної схеми: вимикач мережі 1; перемикач 2 обмоток трансформатора Т2; тумблер контактора К високої напруги 11.

Електрична схема забезпечує широкий діапазон регулювання напруги на електродах, живлення двигуна форвакуумного насоса і перемикач контрольно-вимірювальних приладів. Напруга на електроди розрядної трубки Р подається згідно схеми на рис. 7.9.

При дослідженні електричної міцності міжелектродного проміжку в широкому діапазоні зміни pd напруга на електродах повинна плавно змінюватися від десятків вольт до одиниць кіловольтів. Для цього при роботі на мінімумі кривих Пашена між обмоткою нижчої напруги високовольтного трансформатора Т3 типу НОМ-10 і потенціалом-регулятором Т1 за допомогою перемикача S включається понижуючий

трансформатор Т2 з коефіцієнтом трансформації 0,1. При вимірюванні електричної міцності проміжку в діапазоні значень pd , який відповідає правій або лівій гілці кривої Пашена, перемикач переводиться в положення, зазначене на рис. 7.9, і понижуючий трансформатор Т2 від'єднується від високовольтного трансформатора Т3. Перемикання контактів слід проводити при мінімальній напрузі на виході потенціал-регулятора Т1.

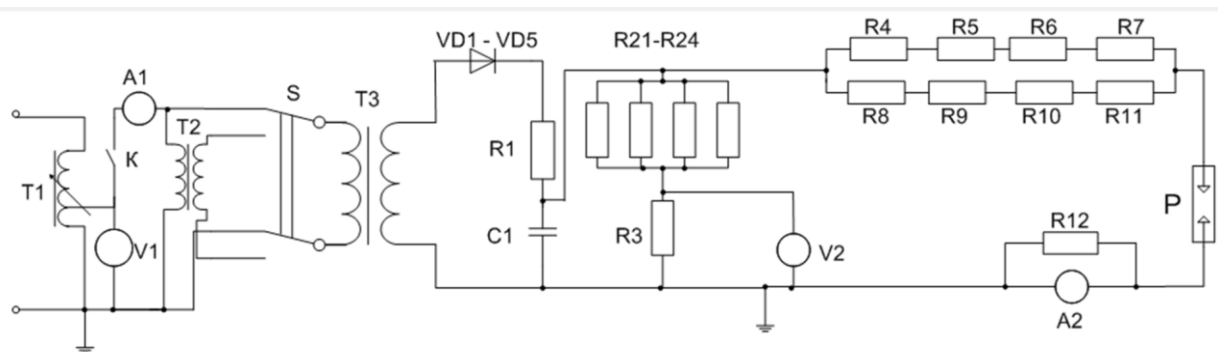


Рис. 7.9. Високовольтна схема живлення стенду [19]:

P – розрядна трубка; Т1 – ЛАТР; Т2 – проміжний понижуючий трансформатор ТВС3-0.63 ($\kappa=0.1$); Т3 – високовольтний трансформатор НОМ-10 ($\kappa=100$); А2 та V2 – міліамперметр та кіловольтметр для зняття ВАХ; С1 – конденсатор фільтру (0.5 мкФ, 25 кВ); VD1...VD5 – діодний блок; S – перемикач; R4...R11 – резистор для обмеження струму розряду (1.3 МОм)

Конденсатор С1 призначено для зниження пульсації випрямленої напруги. Подільник R21-R24/R3 використовують для вимірювання високої напруги, а також для розряду конденсатора С1 після вимкнення схеми.

Перед початком роботи на стенді треба переконатися у тому, що пульт заземлено, захисний екран з оргскла повністю закритий, вилку кабелю живлення підключено до мережі з напругою 220 В (і правильність напрямку обертання двигуна насосу перевірено), а рукоятка потенціал-регулятора перебуває у положенні, що відповідає мінімальній напрузі на його виході. Ручний заземлювач на високовольтному виводі конденсатора (за задніми дверцятами) має бути знято.

Виконання будь-яких робіт з перестановки електродів чи приладів на стенді допускається лише під наглядом викладача після повного відключення установки і накладення переносного заземлювача на високовольтний вивід конденсатора С1.

Методика виконання і завдання

В даній роботі пропонується виконати експериментальні дослідження характеристик тліючого розряду в розрядній трубці в умовах прикладення постійної напруги.

Короткий перелік основних параметрів в запланованих дослідженнях тліючого розряду: струм – до 5 мА; напруга – до 5 кВ; тиск p – від 1 Торр до $2.5 \cdot 10^{-2}$ Торр чи нижче; діаметр трубки – 70 мм; відстань між електродами – $d = 300$ мм; діаметр електродів – 25 мм; матеріал електродів – алюміній; газ – повітря.

Характерний вигляд зон тліючого розряду в трубці на лабораторному стенді подано на фотографіях на рис. 7.10 [19].

Порядок виконання роботи і завдання:

1. Перевірити вихідні позиції органів керування. Подати живлення на стенд.

2. Включити вакуумний насос. Після виходу його на режим за допомогою вентилів 13 та 12 виставити поточне значення тиску для проведення серії дослідів.

3. Експериментально визначити напругу запалювання розряду U_t – подати високу напругу на трубку, збільшувати та фіксувати напругу, коли засвічується розряд (в т.ч. за приладом спостерігати появу струму). Для одних і тих же умов виконати не менше 5 дослідів. Результати занести в табл. 7.3 або іншого зручного формату. Побудувати залежність $U_t(p, d)$.

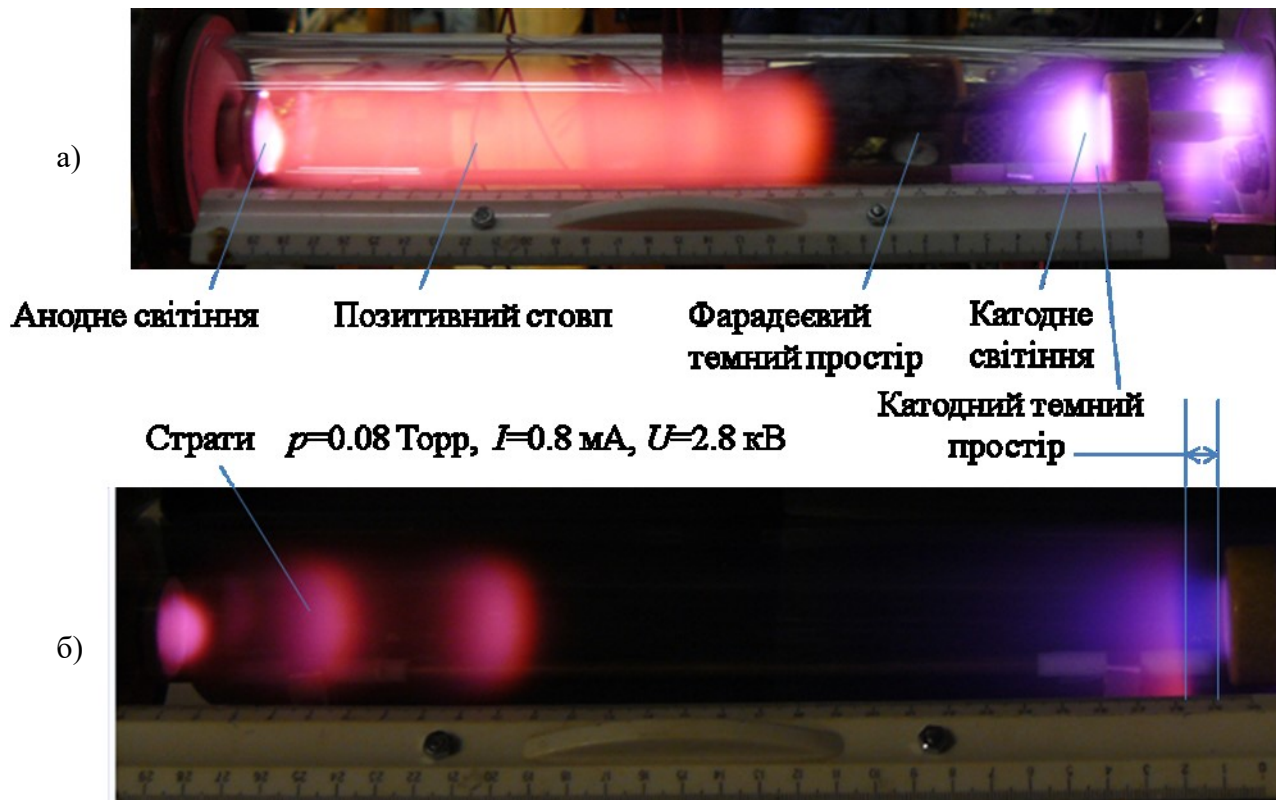


Рис. 7.10. Характерні картини тліючого розряду в лабораторній роботі:
 а – режим з позитивним стовпом; б – режим зі стратами та вимірювання ширини катодного темного простору

4. Зняти ВАХ: збільшуючи напругу кроками 0.5 кВ до 5 кВ, реєструвати напругу та струм приладами 6 та 7 (рис. 7.6). Напруга вимірюється на резисторі R3, а потім розраховується напруга на розрядній трубці з урахуванням сумарного опору резисторів R4...R11 (1.3 МОм). Масштабні коефіцієнти для вольтметрів, кіловольтметра та міліамперметра взяти з документації на стенді. Для одних і тих же умов виконати не менше 5 дослідів. Результати занести в таблицю 7.3.

5. Ознайомитися з характерними темними та світлими зонами тліючого розряду. Дослідити залежність ширини катодного темного простору d_k від тиску в діапазоні $p \approx 0.02 - 0.5$ Торр. Ширину темного простору визначати з використанням лінійки на трубці. В ході роботи слід виконувати фотографування характерних картин розряду та його окремих

ділянок (в т.ч. для визначення ширини темного простору). Результати занести в таблицю 7.4.

6. Регулюванням тиску і струму досягти роботи в режимах нормального та аномального тліючих розрядів. Спостерігати зміну розмірів опорної плями розряду на катоді. Дослідити залежність щільності струму від повного струму $j(I)$: регулювати напругу автотрансформатором Т1 та визначати значення струму і відповідні їм розміри плями розряду на катоді (\emptyset – ефективний діаметр кола чи усереднення осей еліпсів; S – площа плями). Розміри плями оцінювати з фотографій. Розрахувати середній розмір плям $\emptyset_{\text{ср}}$ та відповідну щільність струму $j_{\text{ср}}$. Результати занести в табл. 7.3.

7. Обробити експериментальні дані та розрахувати апроксимації всіх отриманих залежностей (див. Додаток 1). Результати представити на графіках.

8. Порівняти отримані в лабораторній роботі експериментальні результати з результатами інших дослідників, які знайти в літературі. Де можливо, представити апроксимації результатів своїх дослідів та інших дослідників на одному графіку.

9. Зробити висновки, оформити протокол.

10. Протоколи зі схемою експериментального стенду, формули апроксимацій та програми розрахунків і побудови графіків приготувати завчасно перед роботою в лабораторії. Розрахунки і аналіз результатів в лабораторії виконувати із застосуванням відповідної обчислювальної техніки та програмного забезпечення.

Техніка безпеки

Виконувати «Правила техніки безпеки при проведенні робіт в лабораторіях кафедри теоретичної електротехніки». До роботи допускаються студенти лише після проходження інструктажу загального

та на робочому місці (стенді). Всі операції на стенді і робочому полі здійснювати лише під наглядом викладача.

Таблиця 7.3. Результати експериментів і розрахунків $U(I)$, $U(pd)$, $j_{сер.}(I)$

Тиск, Торр	U , кВ	I , мА					$I_{сер.}$, мА	σ_{ib} , мА	ε_{ib} , мА	\varnothing , мм					$\varnothing_{сер.}$, мм	σ	ε	S , см ²	$j_{сер.}$, мА/см ²
		I_1	I_2	I_3	I_4	I_5				\varnothing_1	\varnothing_2	\varnothing_3	\varnothing_4	\varnothing_5					
$p_1 =$	$U_i =$																		
																		
	0.5																		
	1.0																		
	1.5																		
	2.0																		
	...																		
	4.5																		
5.0																			
$p_2 =$	$U_i =$																		
																		
	0.5																		
	1.0																		
	1.5																		
	2.0																		
	...																		
	4.5																		
5.0																			
$p_n =$	$U_i =$																		
																		
	0.5																		
	1.0																		
	1.5																		
	2.0																		
	...																		
	4.5																		
5.0																			

Таблиця 7.4. Результати експериментів і розрахунків щодо зв'язку ширини катодного темного простору та тиску

Загальні умови	p , Торр	$d_{к5}$, мм					$d_{ксер.}$, мм	σ_d , мм	ε_d , мм
		$d_{к1}$	$d_{к2}$	$d_{к3}$	$d_{к4}$	$d_{к5}$			
$U = \dots$ кВ, $I = \dots$ мА	0.02								
	0.1								
	0.2								
	0.3								
	0.4								
	0.5								

Контрольні питання

1. Поясніть хід загальної ВАХ розряду в газі. В якій її ділянці проводять дослідження в даній лабораторній роботі?
2. Які фактори впливають на значення напруги запалювання розряду при пониженому тиску? Чи відрізняється від неї напруга погасання розряду?
3. Як візуально можна розрізнити нормальний та аномальний тліючі розряди?
4. Поясніть з фізичних міркувань характер залежності $U(pd)$.
5. Які апроксимації залежності $U(pd)$ застосовують та в яких умовах?
6. Як визначати напругу запалювання розряду в трубці в ході роботи?
7. Як регулювати тиск в розрядній трубці? Чим та як проводять вимірювання тиску в розрядній трубці?
8. Поясніть характерні темні та світлі зони і розподіл характеристик тліючого розряду в розрядній трубці.
9. Що можна визначати за допомогою навантажувальної прямої?
10. Наведіть приклади застосування тліючих розрядів в газах та характерні параметри режимів?
11. В якому режимі опорна пляма розряду покриває всю поверхню катоду?
12. Що відбувається в темному катодному просторі? З чим пов'язана його ширина та розміри інших зон розряду?

ДОДАТКИ

Д1. Статистична обробка результатів експериментів

Результати експериментів, записані в таблиці, необхідно опрацювати за такою методикою.

Позначимо визначені пробивні напруги для кожного об'єкту або розрядного 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

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

де n - кількість спостережень; A_i - результат i -го спостереження.

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

Оцінка СКВ результатів вимірів знаходиться наступним чином

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

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

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 похибок. Більш наочною й інформативною характеристикою

випадкової похибки ϵ 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:

$$\epsilon = \pm t \cdot \tilde{\sigma}(\bar{A}), \quad (\text{Д.3})$$

де t - коефіцієнт Стюдента, що залежить від кількості спостережень n і вибраної ймовірності P (табл. Д.1). Для технічних вимірів приймають $P = 0,95$ і $P=0,99$ для особливо відповідальних випадків.

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 $\pm\epsilon$ (див. рис.Д.1), вказавши вірогідність їх визначення P в підпису до рисунку.

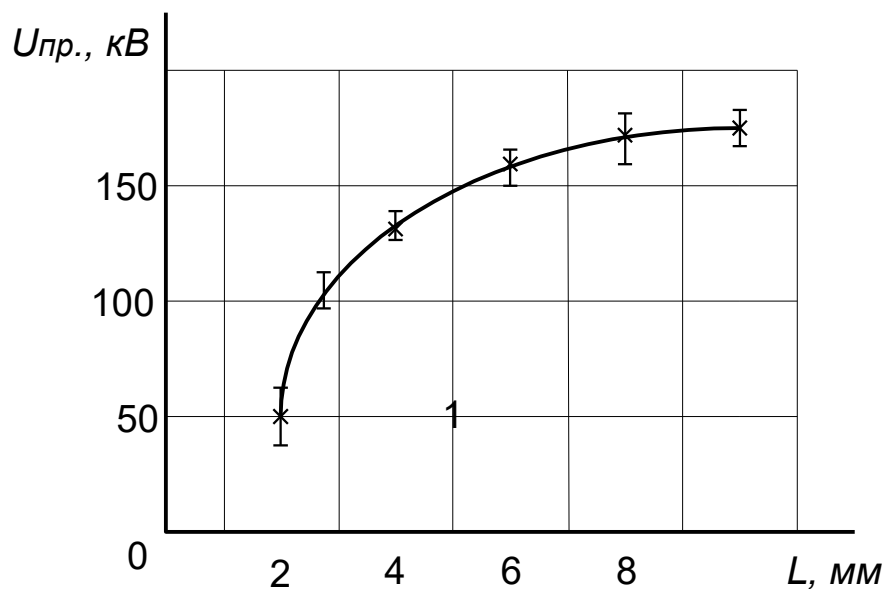


Рис.Д.1. Приклад виконання графіку пробивної напруги з урахуванням довірчих границь випадкової похибки результатів вимірювань з вірогідністю $P=0,95$

За результатами 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

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

де $U_{\text{сер}}$ – середнє значення.

- визначити витримувану напругу (з вірогідністю 90%)

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

де σ' - найбільше значення у відносних одиницях стандартного відхилення. Для зовнішньої ізоляції при короткочасному впливі змінної напруги $\sigma' = 0,03$ [10]. Для лабораторних робіт, викладених в даному навчальному посібнику можна обмежитись наведеним значенням σ' .

Таблиця Д.1. Значення коефіцієнта Стьюдента 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

Д2. Розрядні напруги кульових вимірювальних розрядників

Одна з куль заземлена, нормальні атмосферні умови -
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), кВ											
	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), кВ											
	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 РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ПУЕ:2017. Правила улаштування електроустановок. Затв., наказом Міненерговугілля України від 21.07.2017 № 476. – К.: 2017.- 617 с.
2. Рой В. Ф. Конспект лекцій з дисципліни «Техніка високих напруг». - Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016. – 160 с.
3. В.Ф. Важов, В.А. Лавринович, С.А. Лопаткин. Техника высоких напряжений / Курс лекций для бакалавров направления 140200 “Электроэнергетика”. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006.– 119 с.
4. Техніка і електрофізика високих напруг. За ред. В.О. Бржезицького, В.М. Михайлова/ Харків. НТУ “ХП”. – Торнадо, 2005. – 930 с.
5. Бейер М., Бёк В., Мёллер К., Цаенгль В. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения. Пер. с нем. - М.: Энергоатомиздат, 1989.- 555 с.
6. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах.- М.: Энергоатомиздат, 1986. - 464 с.
7. Техника высоких напряжений. Под ред. Л.В. Разевига. – 2-е изд. – М., Энергия, 1976. – 488 с.
8. Кучинский Г.С., Кизеветер В.Е., Пинталь Ю.С. Изоляция установок высокого напряжения: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
9. Иерусалимов М.Е., Орлов Н.Н. Техника высоких напряжений. К., Издательство Киевского университета, 1967.-444с.
10. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. РД 34.21.122-87.- М.: Энергоатомиздат, 1989.- 56 с.

11. ДСТУ Б В.2.5.-38:2008. Інженерне обладнання будинків і споруд. Улаштування блискавкозахисту будівель і споруд. – К.: Мінрегіонбуд України, 2008.
12. ДСТУ EN/IEC 62305:2012. Lightning Protection (Захист від блискавок, у 4 ч.).
13. ГОСТ 1516.2-97 (2003). Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции.
14. ГОСТ 1516.3-96 (2003). Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции.
15. ГОСТ 17512-82. Электрооборудование и электроустановки на напряжение 3кВ и выше. Методы измерения при испытаниях высоким напряжением (с Изменением N 1).
16. Техніка високих напруг. Лабораторний практикум. Под ред. М.Е. Иерусалимова. - К.: Вища школа, 1987.-216 с.
17. 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 «КП», 2011. – 85 с.
18. Шостак В. О., Козюра В. М., Хомініч В.І., Абрамов В. Б. Техніка і електрофізика високих напруг (Частина 1). Лабораторний практикум для студентів спеціальності 7.090604, 8.090604 «Техніка і електрофізика високих напруг» (Навчальне електронне видання). – К.: НТУУ "КП", 2011. – 62 с.

19. Шостак В. О., Проценко О.Р. Техніка і електрофізика високих напруг (Частина 2). Лабораторний практикум для студентів спеціальності 7.090604, 8.090604 «Техніка і електрофізика високих напруг» (Навчальне електронне видання). – К.: НТУУ "КПІ", 2011. –70 с.
20. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1992.- 536 с.
21. Кучеренко Е. Т. Справочник по физическим основам вакуумной техники. – К.: Вища школа, 1981. – 264 с.