

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені В. Н. КАРАЗІНА

ТЕХНІКА ВИСОКИХ НАПРУГ

Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт
для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня
денної і заочної форм здобуття освіти
за спеціальністю
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Електронний ресурс

Харків – 2025

Рецензенти:

Ю. С. Олійник – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри електро-техніки та електроенергетики навчально-наукового інституту «Українська інженерно-педагогічна академія»;

О. Ю. Єгорова – кандидат технічних наук, теплотехніки та енерго-ефективних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

*Затверджено до розміщення в мережі Інтернет рішенням
Науково-методичної ради Харківського національного
університету імені В. Н. Каразіна
(протокол № 7 від 28 лютого 2025 року)*

Техніка високих напруг : методичні вказівки до виконання лабораторних робіт
Т 38 для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня денної і заочної форм
здобуття освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка» [Електронний ресурс] / уклад.: П. В. Васюченко, І. Г. Кирисов,
О. М. Пономаренко. – Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2025. – (PDF 31 с.)

Методичні вказівки містять детальні інструкції для проведення лабораторних робіт, що охоплюють основні аспекти теорії та практики техніки високих напруг. Здобувачі освіти матимуть можливість практично застосувати отримані теоретичні знання через виконання конкретних завдань, пов'язаних із вимірюванням високих напруг, оцінкою стану ізоляції, визначенням характеристик електричних полів та дослідженням явищ, пов'язаних з електричними розрядами.

Методичні вказівки включають покрокові інструкції, перелік необхідного обладнання та інструментів, а також заходи безпеки, що забезпечують безпечну роботу під час проведення експериментів. Особлива увага приділяється розвитку навичок аналізу та інтерпретації результатів лабораторних досліджень, що сприяє формуванню у здобувачів вищої освіти практичних компетенцій та підготовці їх до професійної діяльності в галузі електроенергетики та електротехніки.

Матеріали методичних вказівок сприяють інтеграції теоретичних знань з практичними навичками, формуванню системного підходу до розв'язання інженерних задач, а також розвитку критичного мислення та технічної творчості у здобувачів вищої освіти.

УДК 621.316(0.75.5)

© Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна, 2025

© Васюченко П. В., Кирисов І. Г.,
Пономаренко О. М., уклад., 2025

ЗМІСТ

Загальні положення	5
Лабораторна робота № 1.	6
Вимірювання високої напруги промислової частоти	
Лабораторна робота № 2.	16
Дослідження електричної міцності повітряного проміжку при змінній напрузі	
Лабораторна робота № 3.	21
Дослідження генератора імпульсних напруг	
Вказівки по оформленню звітів по лабораторним роботам	28
Заходи безпеки	29
Список використаних джерел	30

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

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

Обов'язковою умовою успішного виконання лабораторних робіт є домашня підготовка. На початку опису кожної лабораторної роботи сформульовані її мета й дані вказівки по домашній роботі.

По кожній лабораторній роботі студентами оформляються індивідуальні звіти, що включають виконані домашні завдання, а також відповіді на питання (за вказівкою викладача), наведені наприкінці описи кожної лабораторної роботи.

Наприкінці опису кожної лабораторної роботи наведені контрольні питання, на які повинні відповісти студенти при захисті.

Лабораторна робота № 1

Тема: «Вимірювання високої напруги промислової частоти»

Мета роботи: Ознайомлення з різними способами вимірювання високої напруги промислової частоти в лабораторних умовах.

Загальні відомості

Вимірювання високої напруги є складним відповідальним завданням, пов'язаним з визначенням якості електроенергії і ізоляції електроустановок високої напруги шляхом випробувань. Для вимірювання високої напруги промислової частоти застосовуються: кульові розрядники; електростатичні вольтметри з дільником напруги, амплітудні вольтметри; електронні осцилографи; вимірювальні трансформатори напруги і ін. устаткування і прилади.

Кульові розрядники. Найбільш поширений і простий пристрій для вимірювання амплітуди високої напруги - кульовий проміжок, основною частиною якого – є дві кулі однакового діаметру, що встановлюється поблизу один від одного. Принцип вимірювання кулями заснований на тому, що даній відстані між кулями даного радіусу відповідає певна напруга, при якій відбувається пробій проміжку. Це правило достатньо точно виконується при відносно невеликих відстанях між кулями, що не перевищують половини їх діаметру, оскільки в цьому випадку електричне поле в проміжку мало відрізняється від рівномірного. Кулі придатні для вимірювання при постійній напрузі, змінній напрузі промислової частоти і високої частоти, а також при імпульсній напрузі. Найбільший діаметр куль, що застосовуються в даний час, досягає 2 м; ними можна з точністю 2-3% зміряти напругу до 2.5×10^6 В. Для вимірювання значень змінної і постійної напруги, що діють, застосовуються електростатичні вольтметри, в яких для переміщення рухомої системи використовуються сили електростатичного поля, широко застосовуються також роторні кіловольтметри.

Величина напруги, при якій відбудеться розряд між кулями, визначається по спеціальних таблицях (див. ГОСТ Г751п-72) залежно від відстані між кулями і діаметру куль.

Вибір розрядника як вимірювальний іскровий проміжок визначається наступними його властивостями:

а) вольтсекундна характеристика проміжку у великому інтервалі часу є горизонтальною прямою;

б) зі всіх проміжків із слабо неоднорідним полем кульовий проміжок найлегше виконати, і він має найменші розміри.

Можливі дві схеми включення куль: симетрична і несиметрична (остання найбільш застосовна).

При відстанях між кулями до $0,5 D$ таблиці дають значення розрядної напруги з погрішністю, що не перевищує 3%. Для отримання задовільної точності вимірювань необхідно витримувати певні відстані від куль до землі і сторонніх об'єктів, за всіх умов ця відстань повинна бути більше $1,6 D$ де D - діаметр куль.

Таблиці залежності розрядної напруги від відстаней між кулями відносяться до стандартних умов $P=760$ мм рт.ст. (1013 міллібар), $t=20^{\circ}\text{C}$. При відхиленні умов від стандартних вводиться поправка: значення напруги, узяті з таблиць, множаться на відносну щільність повітря. Поправка на вологість в приміщенні не вводиться, оскільки поле куль слабке не однорідне розрядний канал розвивається протягом доль мікросекунди, і явище захоплення електронів негативними іонами водяної пари практично відсутній.

Вимірювання кулями напруги, наприклад, випробувального трансформатора можна здійснити двома способами:

1 спосіб: Встановлюється деяка напруга U_1 на первинній обмотці; потім кулі, заздалегідь розведення на велику відстань, зближуються до отримання між, ними розряду. Після того вимірюється довжина розрядного проміжку X і по табл. 1 визначається напруга U_2 . Розрядна відстань визначається як середнє арифметичне за даними трьох дослідів. Результати вносяться до табл. 3.

2 спосіб: Між кулями встановлюється відстань X , відповідне деякій вибраній напрузі U_2 . Потім включається випробувальний трансформатор, і напруга плавно збільшується до розряду в проміжку X . Досвід повторюється три рази при кожному значенні відстані X .

У роботі слід застосовувати обидва способи вимірювання напруги. Градуировану криву трансформатора визначати по 6-8 крапкам. При завданні довжини іскрового проміжку X виходити з таблиці розрядної напруги (табл. 1). За отриманими даними для U_1 , U_2 будують градуировану криву, яка інтегрує статистичні помилки, допущені під час проведення вимірювання.

Оскільки вимірювання проводяться в умовах, відмінних від нормальних, то необхідно по барометру і термометру зміряти тиск P і температуру t навколишнього повітря і підрахувати значення відносної щільності повітря:

$$\delta = \frac{0,386P}{273^{\circ} + t}$$

Потім для вибраного значення напруги, що подається, на первинну обмотку U'_{1i} визначити значення U_{2i} – напруга на вторинній обмотці. Набутого значення U_2 помножити на поправочний коефіцієнт $U'_2 = U_{2i} \cdot \delta$.

Таким чином, набутих значень U'_{2i} відображають нормалізовану напругу розряду для даних параметрів установки. По даним U'_{1i} і U'_{2i} - побудувати градуйовану криву випробувального трансформатора.

Електростатичні вольтметри. Для прямого вимірювання високої напруги промислової частоти широко застосовуються електростатичні вольтметри, в яких переміщення рухомої частини викликане, механічними силами електричного поля:

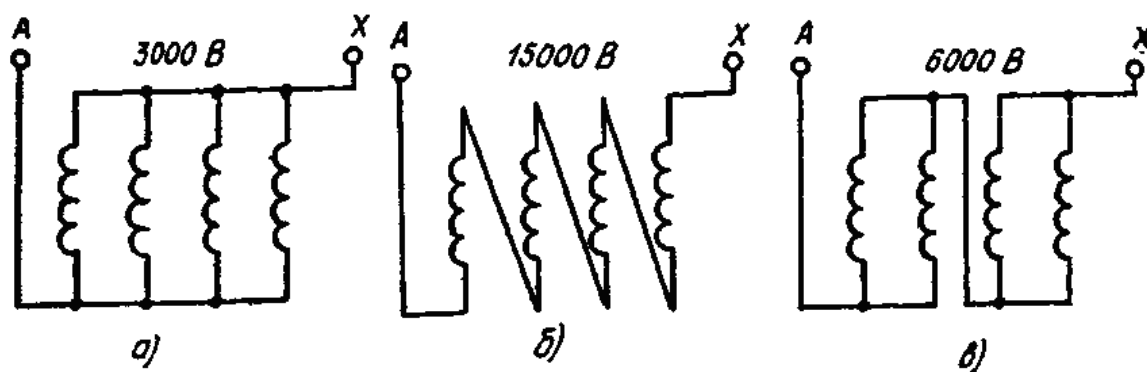
$$F = -\frac{\partial W_{el}}{\partial d},$$

де W_{el} - енергія, запасена електростатичним полем;

d - параметр, що її змінює.

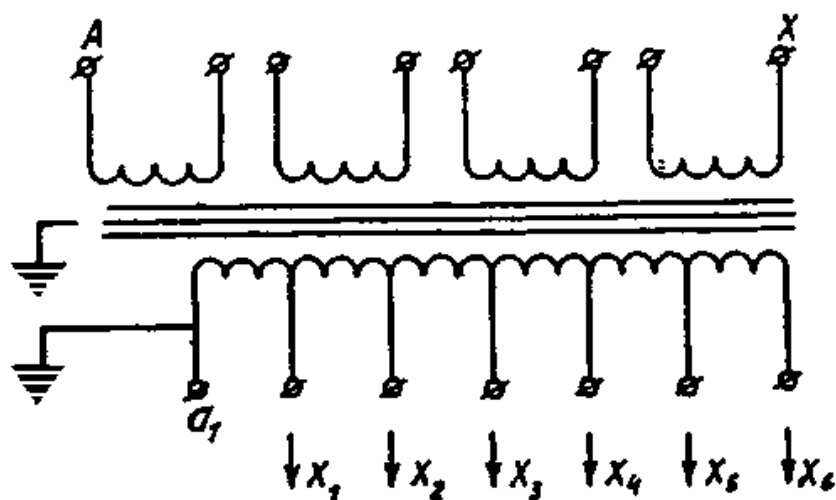
Прикладом електростатичного кіловольметра є кіловольтметр типу С100, в якому один з електродів укріплений на опорному ізоляторі і є нерухомим, а другою виконаний виді екрану з отвором, усередині якого розташований рухомий електрод, укріплений на розтяжках. Під впливом електричного поля між двома дисковими, плоскими і не коронуючими електродами (однорідне поле) рухомий електрод повертається. При цьому розтяжки закручуються, і створюється протидіючий момент. Для демпфування вібрацій, можливих у рухомого органу, служать два повітряні заспокоювачі. Підгонка діапазону вимірювання проводяться шляхів зміни відстані між плоскими електродами. С100 має три межі напруги (25-50-75 кВ); основна погрішність в робочій частині шкали не перевищує 1,5%. Заземлені металеві предмети повинні знаходитися на відстані не менше 1м від електродів включеного приладу.

Вимірювальним трансформатором напруги є малонавантажений спеціальний трансформатор високої напруги. У роботі використовується трансформатор типу І 50, вживаний для точних лабораторних вимірювань (напруга, потужності і ін.) в однофазних ланцюгах змінного струму 50 Гц і використовуваний як зразковий в установках для перевірки трансформаторів напруги. Номінальна первинна напруга: 3000; 6000; 10000; 15000 В. Номінальна вторинна напруга: 100 і $100/\sqrt{3}$ В. Потужність при номінальній вторинній напрузі 100 В - 25 ВА, при $100/\sqrt{3}$ В – 10 ВА; клас точності 0,2. Котушки високої напруги залежно від первинної напруги з'єднуються між собою паралельно, послідовно або послідовно паралельно за допомогою контактної колодки (рис. 1.).



Ріс.1. Способи з'єднання котушок високої напруги:
а - паралельне; б - послідовне; у – послідовно-паралельне.

Високовольтний ізолятор має два контактні стрижні, до яких приєднані початок і кінець первинної обмотки А і Х. У центральному поглибленні ізолятора знаходиться вісім контактних, штифтів до яких приєднуються виводи чотирьох котушок високої напруги. Контактні колодки, одягнені на штифти, здійснюють відповідно паралельне (колодка на 3 кВ) і послідовне (10 і 15 кВ) з'єднання котушок високої напруги. Принципова схема трансформатора представлена на рис. 2.



Ріс. 2. Принципова схема трансформатора

$\frac{15000}{100 / \sqrt{3}}$	$\frac{6000}{100 / \sqrt{3}}$	$\frac{18000}{100 / \sqrt{3}}$	$\frac{15000}{100}$	$\frac{6000}{100}$	$\frac{10000}{100}$
	$\frac{3000}{100 / \sqrt{3}}$			$\frac{3000}{100}$	

Дільники напруги. У високовольних лабораторіях найбільш поширеним приладом для реєстрації напруги будь-якої амплітуди і форми є дільник напруги. Зазвичай від дільника напруги отримує сигнали, які по кабелю підводяться до електроннопроменевого осцилографа або будь-якого вимірювального приладу. Цей метод забезпечує мінімальну прогресивність при правильному виборі дільника напруги. Дільники напруги підрозділяється на: омичні, ємкісні і ємкісно-омичні. На рис. 3 (а) приведена принципова схема вимірювання високої напруги за допомогою дільника напруги і осцилографа, на рис. 3 (б) – схема наміру за допомогою ємкісного дільника напруги і електростатичного кіловольтметра.

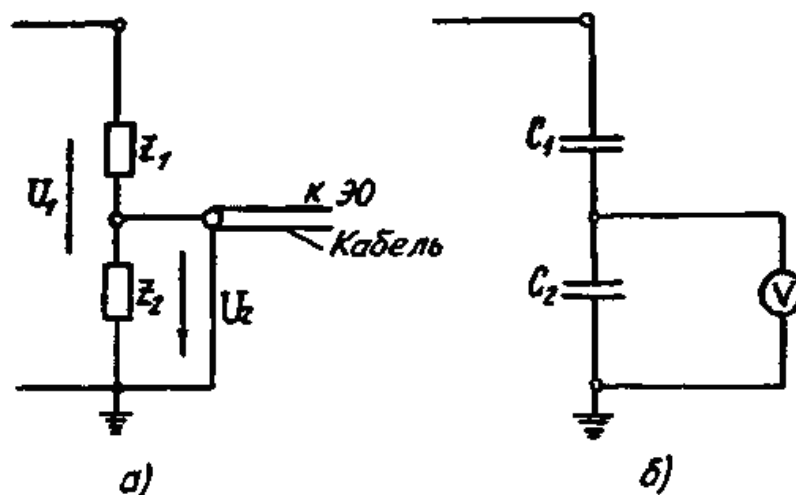


Рис. 3. Принципова схема вимірювання високої напруги:

- а) - за допомогою дільника напруги і осцилографа;
- б) - ємкісного дільника і електростатичного кіловольтметра.

Дільник полягає їх двох послідовно сполучених опорів Z_1 і Z_2 —, які називаються, відповідно, верхнім і нижнім плечима дільника. Відношення напруги на нижньому плечі дільника U_2 до всієї підведеної напруги U_1 називається коефіцієнтом ділення дільника K .

$$K = \frac{U_2}{U_1} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

де Z_2 — опір, отриманий в результаті паралельного складання опору нижнього плеча дільника і опору вимірювальному ланцюгу.

Устаткування і прилади

Кульові розрядники. Випробувальний трансформатор на 100 кВ потужністю 25 кВт. Електростатичний кіловольтметр типу С100 (С96). Вимірювальний трансформатор напруги І 50. Дільник напруги. Ізолятор (об'єкт випробування).

Опис установки

Принципова схема установки приведена на рис. 4.

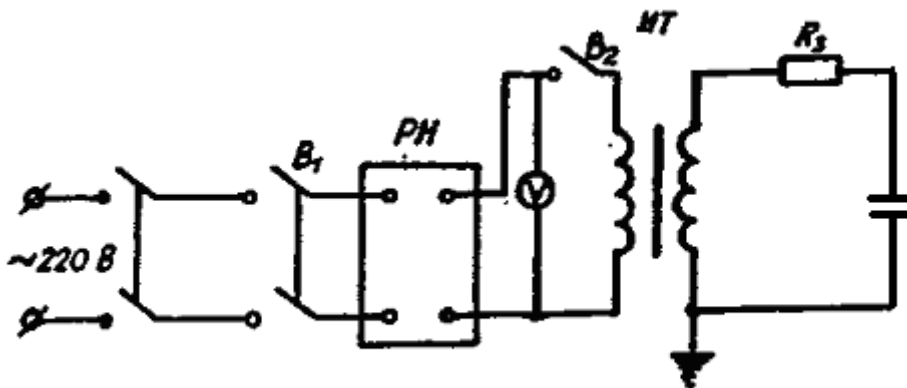


Рис. 4. Принципова схема установки.

Джерелом промислової частоти служить випробувальний трансформатор ІТ 0,22/100 кВ. Його напруга регулюється за допомогою регулятора напруги (РН) і вимірюється на стороні низької напруги трансформатора вольтметром. Опір R_3 служить для захисту трансформатора від великих струмів великої крутизни зрізу напруги при перекритті об'єкту випробування (ІО).

Порядок проведення роботи

Ознайомитися:

- з випробувальною установкою;
- з інструкцією по техніці безпеки для даної установки.

Зібрати схему у відповідності з рис 5, а.

Провести вимірювання високої напруги випробувального трансформатора по кіловольтметру С96 (С100), задаючись 5-6 значеннями на кожній межі шкали кіловольтметра. Результати вимірювань записати в табл. 2.

Зміряти високу напругу за допомогою кульових розрядників, для цього зібрати схему згідно рис. 5, а і виконати вимірювання. Результати вимірювання записати в табл. 3.

Зміряти високу напругу за допомогою лабораторного вимірювального трансформатора напруги типу І50, для цього зробити наступне:

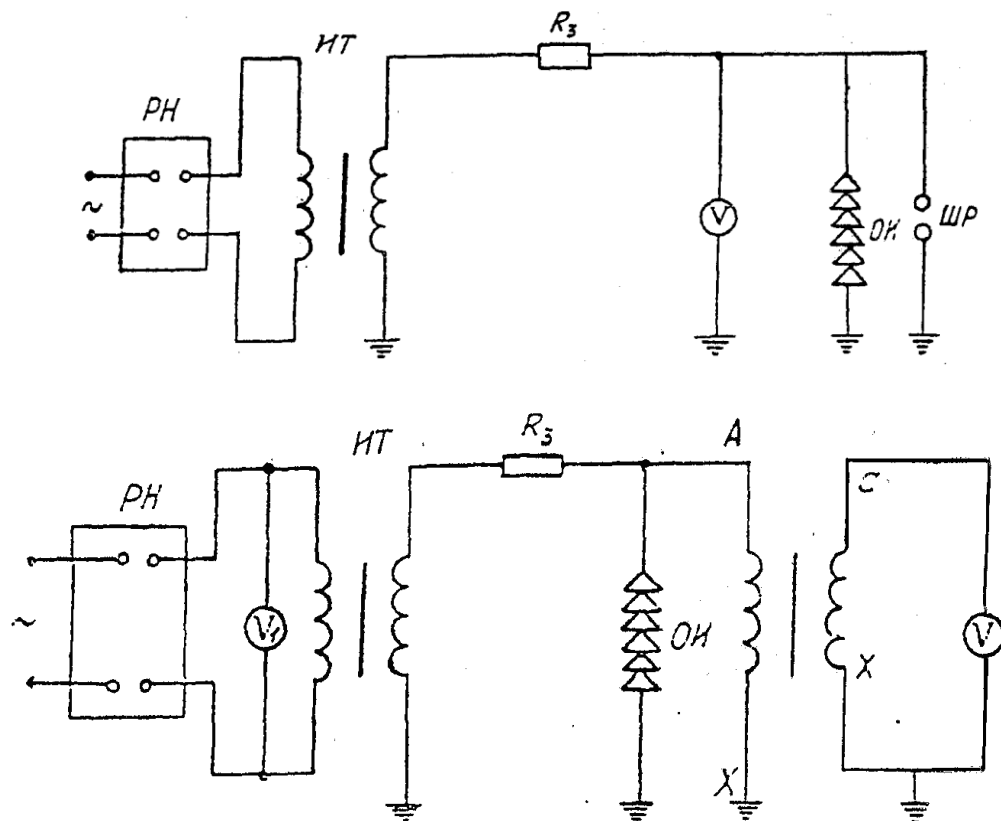


Рис. 5. Схема включення вимірювальних приладів:

а) – кіловольметра і кульових розрядників;

б) – вимірювального трансформатора.

- Зібрати схему вимірювання високої напруги відповідно до рис.5, б.

- Встановити колодку на 10 - 15 кВ і провести вимірювання напруги на низьковольтних виводах вимірювального трансформатора при чотирьох коефіцієнтах трансформації відповідно до рис.5,б. Наприклад, при AX – (10 – 15) кВ і при підключенні вольтметра V2 до виводів би - x1 маємо коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора $K_{I.T} = \frac{15000}{100/\sqrt{3}}$.

При цьому слід встановити по вольтметру V2 два – три значення напруги (у прибудовах $100/\sqrt{3}$), підрахувати напругу на високій стороні трансформатора (AX) $U_{AX} = U_{ax} \cdot K_{I.T}$. і коефіцієнт трансформації випробувального трансформатора ІТ.

Таблиця 1 - Розрядної напруги кульового проміжку при заземненні однієї кулі для імпульсів негативної полярності, змінної і постійної напруги обидві полярностей $t = 20^{\circ}\text{C}$, $P = 1013 \text{ кПа}$ (760 мм рт.ст.)

Відстань між кулями X, см	Діаметр куль Ш, см			
	6.25	12.5	25	50
1	2	3	4	5
0,5	17,2	16,8		
0,6	20,2	19,9		
0,7	23,2	23,0		
0,3	26,2	26,0		
0,9	29,1	28,9		
1,0	31,9	31,7	31,7	
1,2	37,5	37,4	37,4	
1,4	12,9	43,9	42,9	
1,6	48,1	46,1	46,1	
1,8	53,5	53,5	53,5	
2,0	58,5	59,0	59,0	59,0
2,2	63,0	64,5	64,5	64,5
2,4	67,5	70,0	70,0	70,0
2,6	72,0	75,0	75,5	75,5
2,8	76,0	80,0	81,0	81,0
3,0	79,5	85,0	86,0	86,0
3,5	(87,5)	97,0	99,0	99,0
4,0	(95,0)	108	112	112
4,5	(101)	119	125	125
5,0	(107)	129	137	138
6,0		146	161	164
7,0		(161)	IS4	109
8,0		(174)	206	214
9,0		(105)	226	239
10,0		(195)	244	263
15,0			(314)	373
20,0			(366)	460
24,0				515

Результати досвіду внести до табл. 4. Після проведення вимірювань побудувати графіки залежності $U_2 = f(U_1)$, зробити висновки після точності вимірювань і можливих помилок, що допускаються при вимірюванні високої напруги.

Вказівки по оформленню звіту

У звіті про роботу повинно бути: найменування і мета роботи, принципова схема установки (рис. 2.4), результати вимірювань (табл. 2.2, 2.3, 2.4), графік залежності $U_2 = f(U_1)$, а також висновки по роботі.

Контрольні питання

1. Які існують методи вимірювання при високій напрузі?
2. За яким принципом працює кіловольтметр?
3. Чому ємкісні дільники не застосовуються для вимірювання постійної напруги?
4. Як підрахувати прогресивність в коефіцієнті ділення при підключенні вольтметра до дільника?

Таблиця 2 - Результатів вимірювань напруги кіловольтметром

Номер досвіду	Напруга на низькій стороні ІТ U_1 (В)	Показання кіловольтметра U_2 (кВ)	Коефіцієнт трансформації випробувального трансформатора
1	2	3	4

Таблиця 3 - Результатів вимірювань напруги кульовим розрядником

Номер досвіду	Відстань між кулями, см	Напруга між кулями, В				U_2 , кВ	U_2' , кВ	Примітка
		1	2	2	Хсер			

Таблиця 4 - Результатів вимірювань напруги вимірювальним трансформатором

Вимірювальний трансформатор	Лабораторний вимірювальний трансформатор напруги І50		Коефіцієнт трансформації випробувального трансформатора U_{AX} / U_1
Напруга на низькій стороні $U_1, В$	Схема приєднання вольтметра а - х	Напруга на низькій стороні $U_{ax}, В$	

Лабораторна робота № 2

Тема: «Дослідження електричної міцності повітряного проміжку при змінній напрузі»

Мета роботи: Дослідження впливу форми електродів на розрядну напругу повітряних проміжків при атмосферному тиску; визначення за експериментальними даними значень пробивної напруги електричного поля в повітрі.

Загальні відомості

Повітря широко використовується як ізоляція на повітряних лініях електропередачі, в трансформаторах і електричних апаратах. При заданій довжині розрядного проміжку розрядна напруга залежить від конфігурації електричного поля. У однорідному полі електричний пробій повітря спостерігається при досягненні в ній критичних (початкових) значень напруженості електричного поля E_0 при відповідній різниці потенціалів між електродами U_0 ($E_0 = 30$ кВ/см). У сильно неоднорідних полях в області з максимальним значенням E розвивається локальний – коронний розряд. Повний пробій розвивається при пробивній напрузі U_p більшому початкової напруги корони. У однорідному полі $E(x) = \text{const}$ початкова і пробивна напруга співпадає U_0, U_p .

Електроди площина – площина Плоскі електроди застосовуються для дослідження розряду в однорідному полі.

У проміжку площина – площина спостерігається збільшення напруженості на краях електродів, тобто «краєвий ефект». Вирівнювання електричного поля добиваються за допомогою електродів із закругленими краями (електроди Роговського)

Для розрахунку пробивної напруги повітря між плоскими електродами (однорідне поле) при тиску, близькому до атмосферного, можна використовувати емпіричну формулу

$$U_p = 24,5 \cdot \delta \cdot S + 6,4 \sqrt{\delta \cdot S} \text{ кВ}_{\text{max}}, \quad (1)$$

де S – відстань між електродами, см;

P – тиск, мм рт. ст.;

T – температура, К.

За нормальні умови беруться $P = 760$ мм. рт.ст. і $T = 293^0\text{K}$, при яких $\delta = 1$.

Електроди куля – куля. Розрядна напруга проміжку залежить від діаметру

куль III, відстані між ними S і способу включення куль (симетричне включення, корду обидві кулі знаходяться під напругою, і несиметричне, коли одна куля заземлена). У роботі досліджується розрядна напруга проміжку при симетричному включенні куль. Залежно від відстані між кулями поле в проміжку може бути однорідне або неоднорідне. При відстані між кулями $S = D$ поле близьке до однорідного. Самостійний розряд починається при високих середніх градієнтах в проміжках і розвивається у формі іскрового розряду. При цьому не спостерігається явищ корони.

При симетричній напрузі $\pm 0,5U$ пробивна напруга між парами рівна (за умови $S/D = 1$)/

де

$$E_0 = 27.2 \cdot \delta \cdot \left(I + \frac{0.54}{\sqrt{r \cdot \delta}} \right) \text{ кВ}_{\text{max}}/\text{см}$$

r – радіус кулі, см;

δ – геометричний коефіцієнт, що враховує неоднорідність поля, його значення приведені в таблиці 1.

Таблиця 1 - Значення для геометричного коефіцієнта

S/r	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1	1,5	2
δ	1,034	1,068	1,102	1,137	1,173	1,208	1,283	1,359	1,559	1,770

Електроди стрижень – стрижень, стрижень – площа. Ці проміжки характеризуються сильно неоднорідним полем і високою напруженістю електричного поля у краю стрижньового електроду. Тому в проміжках виразно спостерігається стадія коронного розряду, а пробивна напруга значно нижча, ніж в однорідних полях при однакових міжелектродних відстанях.

При однаковій відстані між електродами розрядна напруга проміжку стрижень – площа нижче за розрядну напругу стрижень – стрижень, оскільки в першому випадку (через велику ємкість системи канал стример - площа) розряд на кінчику стримера, а, отже, і напруженість поля поблизу нього виявляється вищою, що полегшує умови розповсюдження стримера углиб проміжку.

Аналітичних виразів для розрахунку пробивної напруги вказаних проміжків немає. Значення пробивної напруги визначаються експериментально для конкретної установки.

Опис установки

Експериментальна установка складається з автотрансформатора (АТ), випробувального трансформатора (ІТ), вольтметра (V), захисного опору (R_3) і набору електродів. Випробувальний трансформатор має найбільша напруга 100 кВ. Середня точка обмотки високої напруги приєднується до сердечника і корпусу. Для зменшення струму в обмотках трансформатора при розряді послідовно з електродами включається захисний опір (близько 100 кОм).

Дослідження електричної міцності повітря проводиться на високовольтній випробувальній установці промислової частоти, схема якої представлена на рис. 3.1.

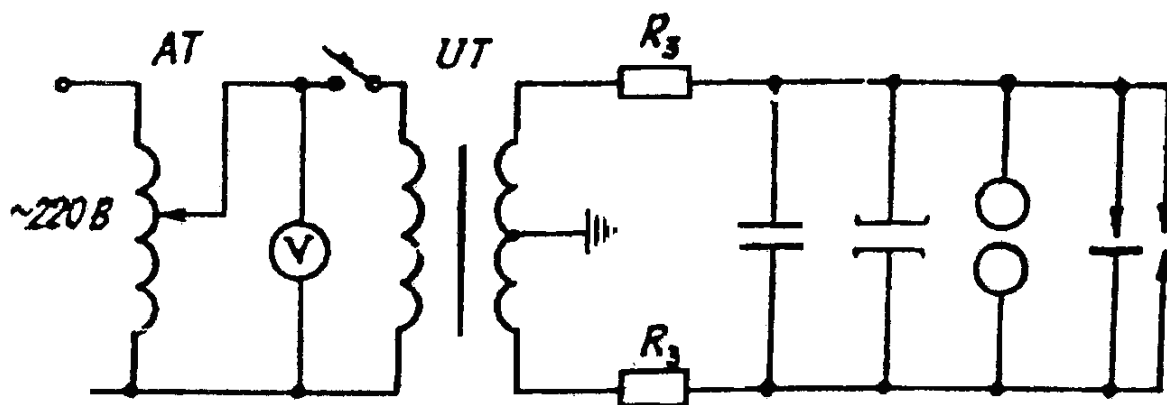


Рис. 1. Схема випробувань повітряних проміжків

Регулювання напруги здійснюється за допомогою автотрансформатора АТ типу РН. Амплітуда високої напруги визначається за свідченнями вольтметра V, включеного в ланцюг первинної обмотки випробувального трансформатора, з урахуванням градуйованої кривої.

Порядок проведення роботи

Встановити досліджуваний проміжок між електродами. Зняти заземлення з високовольтних виводів ІТ і закрити двері захисної огорожі. Перевірити нульове положення ручки РН, вимикачем подати напругу мережі на РН. Відстань між електродами змінюється дистанційно і визначається за вимірювальною шкалою пристрою.

Плавню підняти напругу ІТ до пробою між електродами зафіксувати напругу по вольтметру, зняти напругу. Досвід повторити 3-4 рази для набуття середнього значення U_p .

Встановити ручку АТ в нульове положення, зміряти відстань між електродами і провести вимірювання U_p .

Для зміни електродів необхідно встановити ручку АТ в нульове положення, зняти напругу мережі, відкрити двері огорожі, накласти заземлення на високовольтні виводи ІТ.

Зняти залежність розрядної напруги U_p від відстані між електродами S для проміжків:

- площа – площа;
- електроди Роговського;
- куля – куля;
- стрижень – площа;
- стрижень – стрижень.

Побудувати графіки $U_p = f(S)$; $E_{сер} = f(S)$.

У дослідах рекомендується швидкість підйому напруги ≈ 1 кВ/с.

Всіх набутих значень пробивної напруги повинні бути приведені до нормальних атмосферних умов по формулі:

$$U_{Pн.} = \frac{U_p}{\delta} \quad \text{кВ}_{діюче}$$

Середнє розрядну напруженість обчислюють за формулою $E_{сер} = \frac{U_{PH}}{S}$,

відстань S змінювати в межах від 0,5 до 4,0 см, задаючись – 5 значеннями.

Для зіставлення розрахункових і досвідчених даних останні треба помножити на $\sqrt{2}$.

Результати вимірювань занести в таблицю 2.

Таблиця 2 - Результати вимірювань.

Тип електродів	S , см	U_{1HM} , В				U_p , кВ	U_{Pi} , кВ	$E_{сер}$, кВ/см	$U_{сер}$, розрахунок кВ	Примітка
		1	2	3	середнє					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Вказівки по оформленню звіту

У звіті по роботі повинні бути: найменування і мета роботи, принципова схема установки (рис. 1.), результати вимірювань (таблиця 2.), графіки залежності $U_p = f(S)$; $E_{сер} = f(S)$. На основі аналізу експериментальних даних і зіставлення їх з даними розрахунку сформулювати висновки, що характеризують прийнятий метод і результати дослідження, відобразити характер залежності електричної міцності повітря від ступеня неоднорідності електричного поля в іскровому проміжку.

Питання для самоперевірки

1. Як відбувається процес ударної іонізації?
2. У чому полягають особливості електричного розряду в неоднорідних полях, і чим вони обумовлені?
3. Чому електрична міцність повітряного проміжку «стрижень – стрижень» більше, ніж в проміжку «стрижень - площа»?
4. Як пояснити залежність електричної міцності повітряного проміжку «куля – куля» від відношення S/D ?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

Тема роботи «Дослідження генератора імпульсних напруг»

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

Стислі теоретичні відомості

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

Випробування ізоляції устаткування стандартними «грозовими» імпульсами, що мають тривалість фронту $(1,2 \pm 0,4)$ мкс і тривалість до напівспаду імпульсу (50 ± 10) мкс проводять за допомогою генераторів імпульсної напруги (ГІН). Схеми ГІН достатньо різноманітні, проте випробування ізоляції, зазвичай, проводять генераторами з ємнісними накопичувачами, що володіють вельми невеликими паразитними індуктивностями елементів.

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

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

конденсатора $\tau_1 = C_1 \cdot R_1$ була багато більшою постійної часу заряджання

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

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

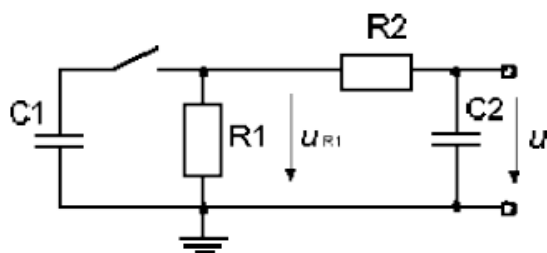


Рис. 1 Схема одноступеневого ГІН

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

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

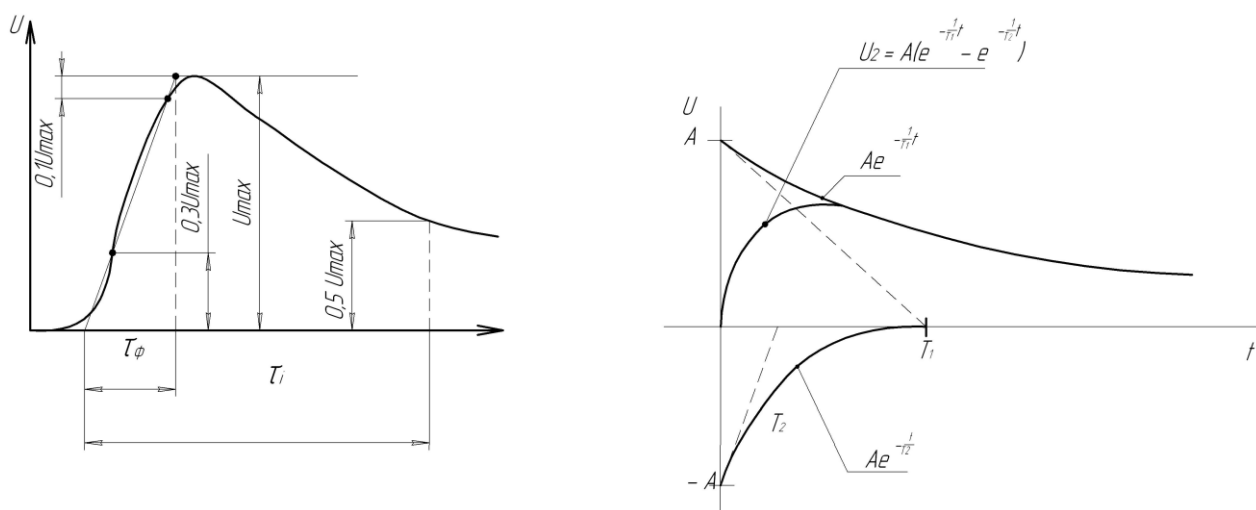


Рис. 2 Схема формування імпульсу ГІН

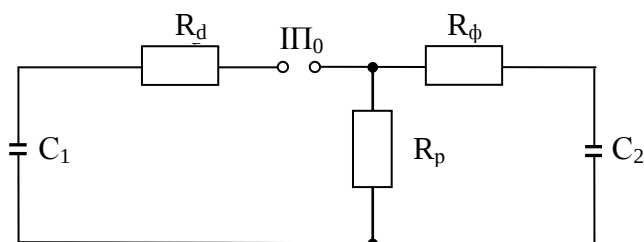


Рис. 3 Схема заміщення розрядного ланцюга ГІН

Вихідні дані

$$\tau_u = 50 \text{ мкс};$$

$$C_1 = C_i / n = 0,11 / 4 = 0,0275 \text{ мкФ};$$

$$R_d = 4 \cdot 13 = 52 \text{ Ом};$$

$$C_2 = 2000 \text{ пФ} = 2000 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} = 2000 \cdot 10^{-6} \text{ мкФ};$$

$$\tau_\phi = 1,2 \text{ мкс};$$

$$\tau_u = 0,7 C_1 R_p;$$

$$\tau_\phi = 2,3 C_2 (R_d + R_\phi);$$

$$R_p = \tau_u / 0,7 C_1;$$

$$R_\phi = \tau_\phi / 2,3 C_2 - R_d.$$

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

ГН, називається коефіцієнтом використання ГН.

З конструктивних міркувань фронтний резистор R_2 розташовують перед основним резистором R_1 (див. рис. 4).

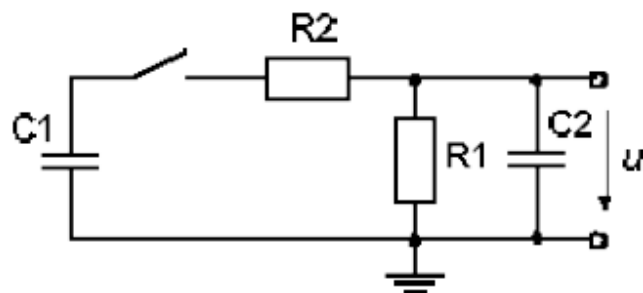


Рис. 4 Варіант схеми одноступеневого ГН

В цьому випадку напруга на виході ГН зменшується ще й за рахунок дії ділянки R_1-R_2 , так що коефіцієнт використання виявляється меншим на коефіцієнт ділення цього ділянки $\eta = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$.

Схему ГІН згідно рис. 1 або рис. 4 ще називають *одноступеневою*. Використання подібної схеми при напрузі більше 250-300 кВ стає неприйнятним внаслідок великих витрат на випрямляч і великих розмірів елементів.

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

На рис. 5 показана схема *чотириступеневого* ГІН, який має зарядний пристрій на трансформаторі TV_1 , захисному обмежувальному опорі $R_{зах}$ і випрямлячі VD_1 , а також *чотири* основні конденсатори C_1 , кульові розрядники FV_1-FV_5 , демпферні резистори R_d і елементи формування фронту імпульсу R_2-C_2 .

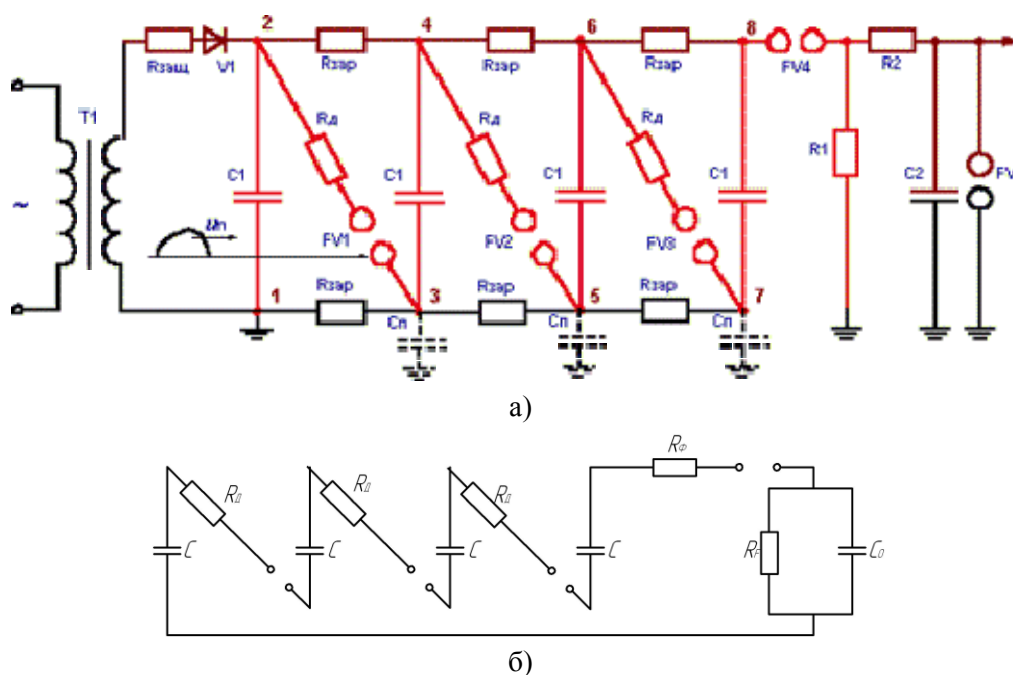


Рис. 5 Схема чотириступеневого ГІН (а))
та схема його розрядної ланки (б))

Відстані між кулями проміжків FV_1-FV_4 підбрані так, що їх пробивна напруга дещо більша зарядної напруги. Символами C_n позначені паразитні ємності устаткування, що грають істотну роль в роботі генератора.

Конденсатори C_1 ГІН заряджають від високовольтного випрямляча через зарядні резистори $R_{зар}$ паралельно до однакової напруги U_0 . Після цього на проміжок FV_1 подається додатковий *запалювальний* імпульс напруги, так що цей проміжок пробивається. Потенціал точки 3 практично миттєво стає рівним U_0 , оскільки величина опору резистора R_d мала і мала постійна часу кола R_d-C_n . Потенціал точки 4 по відношенню до землі при цьому рівний сумі потенціалу точки 3 і напруги U_0 , а потенціал точки 5 залишається нульовим, оскільки паразитна ємність C_n не встигає заряджатися через порівняно високоомний резистор $R_{зар}$. Напруга на проміжку FV_2 виявляється рівною $2U_0$ і проміжок FV_2 пробивається, що приводить в перший момент часу до появи напруги $3U_0$ на проміжку FV_3 . Аналогічно пробивається і проміжок FV_4 , так що всі чотири конденсатори виявляються сполученими послідовно через іскрові проміжки і

резистори R_0 . Резистор R_0 використовується для демпферування коливань в контурі $C_1-FV1-C_n$, в якому внаслідок наявності *індуктивностей проводів* можуть виникнути затухаючі коливання з великою амплітудою.

На рис. 5 червоним кольором (продубльовано на рис. 5, б)) показаний контур розряду конденсаторів, що утворюється при формуванні імпульсу. Напруга $4U_0$ (або $n \cdot U_0$ при n конденсаторах) називається *сумарною зарядною напругою* ГН; іншою важливою характеристикою ГН є *найбільше* значення *енергії*, що запасається генератором $\frac{n \cdot C \cdot U_{ном}^2}{2}$. При зміні зарядної напруги потрібне переналаштування іскрових проміжків.

Як пусковий проміжок $FV1$, зазвичай, використовується триелектродний розрядник (тригатрон). На рис. 6 представлений тригатрон у розрізі.

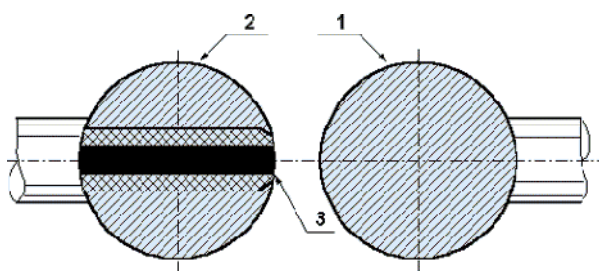


Рис. 6. Будова триелектродного розрядника (тригатрона)

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

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

Процеси в міжелектродному проміжку при впливі імпульсних напруг, а отже, його імпульсна електрична міцність, суттєво залежать від розподілення електричного поля в проміжку, крутизни та форми напруги, що впливає, властивостей ізоляційного середовища та множини інших факторів. Тому імпульсна електрична міцність ізоляційних проміжків визначається на підставі експериментальних досліджень. Імпульсний електричний пробій (розряд) газових проміжків розвивається за тим же механізмом, що і електричний пробій під дією постійної напруги або напруги, що змінюється повільно. Але амплітуда напруги при імпульсному електричному пробіі іскрового проміжку може часто суттєво перевищувати постійну пробивну напругу того ж проміжку. Це пояснюється тим, що тривалість хвилі імпульсної напруги може виявитися близькою до часу, необхідного для формування повного перекриття іскрового проміжку. В цьому випадку для забезпечення формування каналу електричного розряду за час тривалості імпульсу вимагається прискорити процеси відповідальні за формування розряду. Це можливо реалізувати завдяки збільшенню амплітуди прикладеної імпульсної напруги, що приводить в свою чергу до збільшення напруженості електричного поля в міжелектродному проміжку і інтенсифікації формування розряду. В лабораторних умовах ізоляційні проміжки випробовують повними та зрізаними імпульсами напруги. Основними часовими параметрами імпульсу є: для повного – тривалість фронту (τ_f), повна тривалість імпульсу (τ_i); для зрізаного імпульсу – передрозрядний час (τ_3).

Висновки

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

Вказівки по оформленню звіту

1. Вказати назву лабораторної роботи, її мету та завдання.
2. Навести принципову електричну схему ГІН, приведену на рис. 4, навести опис конструкції та принцип дії ГІН.
3. Привести схему з формування імпульсу.
4. Зробити висновки з проведеної лабораторної роботи.

Питання для самоперевірки

1. Приведіть спрощену схему генератора стандартних грозових імпульсів і поясніть принцип його дії.
2. Приведіть спрощені схеми зарядної та розрядної ланок генератора імпульсних напруг, поясніть принцип дії і форму отримуваних імпульсів.
3. Поясніть принцип роботи багатоступінчатого генератора імпульсних напруг.
4. Які види перенапруг можна отримати за допомогою ГІН?
5. Який вплив справляють параметри розрядної ланки ГІН на тривалість фронту й імпульсу напруги, а також коефіцієнт його використання?
6. Чому коефіцієнти використання зарядної ланки, форми імпульсу й схеми менші за одиницю; від чого залежать вказані коефіцієнти?
7. Яким чином змінюється полярність імпульсу напруги ГІН?

8. Як регулюється амплітуда імпульсу напруги ГІН?
9. Які наслідки ввімкнення в розрядну ланку ГІН фронтової індуктивності?
10. Як змінюється форма імпульсу після ввімкнення фронтової ємності?
11. Чому ізоляція трансформаторів, реакторів та обертальних електричних машин повинна випробовуватися повною й зрізаною імпульсними хвилями?

ВКАЗІВКИ ПО ОФОРМЛЕННЮ ЗВІТІВ ПО ЛАБОРАТОРНИМ РОБОТАМ

Звіт повинен містити: найменування експерименту, схему установки, таблиці результатів вимірів, аналіз і висновки про результати роботи, пропозиції можливих заходів щодо підвищення техніко-економічних показників СЕП.

ЗАХОДИ БЕЗПЕКИ

1. Перед допуском до роботи на лабораторній установці необхідно пройти інструктаж з техніки безпеки при роботі в лабораторії.
2. Зборку схеми необхідно проводити при відключеній напрузі. Включати установку слід після перевірки схеми викладачем.
3. У ході роботи всі зміни в схемі (переключення) робити при відключеній установці.
4. По закінченні експерименту схему відключити і робоче місце здати викладачу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бржезицький В. О. Техніка і електрофізика високих напруг : навч. посібн. / В. О. Бржезицький, А. В. Ісакова, В. В. Рудаков ; за ред. В. О. Бржезицького. – Харків : НТУ «ХПІ». – Торнадо, 2005. – 930 с.
2. Гажаман В. І., Погуляєв Є. С., Цимбалюк А. У. Посібник для працівників, які організовують або виконують роботи в електроустановках / В. І. Гажаман, Є. С. Погуляєв, А. У. Цимбалюк. – Харків : Форт, 2003. - 152 с.
3. Маврін О. І. Техніка та електрофізика високих напруг : конспект лекцій / О. І. Маврін, К.Б. Покровський. – Львів : Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2008. – 100 с.
4. Остапчук О.В., Денисюк П.Л., Матеєнко Ю.П. Електрична частина станцій та підстанцій. Навчальний посібник. – Київ: КПУ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 182 с.
5. Бардик Є.І. Електрична частина станцій та підстанцій. Основне електрообладнання. – Київ: «Політехніка», 2022. – 250 с.

Електронне видання комбінованого використання
Можна використовувати в локальному та мережному режимі

ВАСЮЧЕНКО Павло Вікторович
КИРИСОВ Ігор Геннадійович
ПОНОМАРЕНКО Олена Михайлівна

ТЕХНІКА ВИСОКИХ НАПРУГ

Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт
для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня
денної і заочної форм здобуття освіти
за спеціальністю
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

В авторській редакції

Підписано до розміщення 28.02.2025. Гарнітура Times New Roman.
Ум. друк. арк. 1,69. Обсяг 0,372 Мб. Зам. № 81/25.

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3367 від 13.01.2009
Видавництво ХНУ імені В. Н. Каразіна