

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

**ВАРШАМОВА ІРИНА СЕРГІЇВНА**



УДК 621.327.7

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ІСКРОВОГО РОЗРЯДНИКА  
ДЛЯ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ГАЗОРОЗРЯДНОГО УСТАТКУВАННЯ**

Спеціальність 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків–2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі загальної електротехніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

**Науковий керівник** доктор технічних наук, старший дослідник  
**Томашевський Роман Сергійович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
директор навчально-наукового інституту  
енергетики, електроніки та електромеханіки.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор,  
член-кореспондент НАН України  
**Вовченко Олександр Іванович**,  
Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України,  
директор;

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник  
**Вінніков Денис Вікторович**,  
Національний науковий центр  
«Харківський фізико-технічний інститут»,  
відділ магнітоплазмових технологій та малогабаритних ім-  
пульсних прискорювачів.

Захист відбудеться 06 травня 2021 р. о 14<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий 26 березня 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Олена ЮР'ЄВА

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Іскровий розряд використовується в різних пристроях, де довжина іскрового проміжку може коливатися в широких межах. Зміна довжини іскрового проміжку призводить до зміни опору іскрового каналу і впливає на струм розряду. Також, зміна довжини іскрового проміжку призводить до зміни енергії, що виділяється в іскровому розряді. Для прикладних задач виникає потреба у визначенні впливу тиску та довжини розрядного проміжку на введення енергії в іскру. Але у цьому випадку виникає проблема у відокремленні цих впливів на введення енергії в іскровий розряд. Це пов'язано з тим, що зміна початкового тиску газу або довжини іскрового проміжку призводить до зміни напруги пробиття проміжку. Тому, за незмінних інших параметрів розрядного кола, в цих умовах відбувається зміна повної енергії розряду із-за зростання напруги заряджання конденсатора для пробиття проміжку. В результаті, це ускладнює виявлення впливу початкового тиску газу або довжини іскрового проміжку на введення енергії в іскровий канал в умовах зміни повної енергії розряду. Іскровий розряд також використовується в імпульсних джерелах світла. У таких джерелах іскровий розряд запалюється в газі при початковій температурі навколишнього середовища, але при високому тиску. Для цього важливо вивчити вплив тиску ізотермічно стисненого газу на ефективність перетворення енергії розряду у випромінювання.

Дослідження впливу довжини проміжку на енергію, що виділяється, важливе з практичної точки зору. Це пов'язано з тим, що іскова енергія впливає на надійність займання горючих сумішей. Енергія іскрового розряду впливає на процес ініціювання детонації в пристроях детонації, таких як імпульсна детонаційна машина та детонаційний пістолет із компресійним імпульсом. Енергія, що виділяється в іскровому каналі, впливає на період відновлення діелектричної міцності іскрових вимикачів. У генераторах наночасток зміна довжини розрядного проміжку призводить до перерозподілу енергетичного балансу між енергією, що виділяється в газорозрядному каналі, і втратами енергії в приелектродних областях. Цей перерозподіл впливає на ефективність утворення наночасток. Енергетичний баланс в іскровому розряді також впливає на енергетичну ефективність обробки електричним розрядом.

Таким чином, виникає науково-практична задача у визначенні впливу параметрів іскрових розрядників, таких як початковий тиск газу у розряднику та довжина іскрового проміжку, з метою зміни їх властивостей залежно від області використання таких розрядників у високовольтному газорозрядному устаткуванні. Наприклад, при одночасній зміні довжини проміжку та тиску залишається незмінною напруга пробиття розрядника, але забезпечується зменшення енергії розряду, що вводиться в іскровий канал, для прискорення часу відновлення електричного опору розрядника. У разі застосування розрядника, як джерела випромінювання, здійснюється зміна параметрів розрядника з метою досягнення максимальної випромінювальної здатності.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі загальної електротехніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» – її результати впроваджено при виконанні науково-дослідної роботи Національного технічного університету «Харківсь-

кий політехнічний інститут» К1502 «Сучасні проблеми та перспективи розвитку електротехнічних пристроїв та систем» (ДР №0119U002551), де здобувачка була виконавцем окремих розділів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є обґрунтування параметрів іскрових розрядників для високовольтного електророзрядного устаткування на підставі виявлення впливу довжини розрядного проміжку та початкового тиску газу на газорозрядні процеси.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені задачі:

- на підставі огляду літератури провести аналіз впливу параметрів іскрового розрядника на розвиток іскрового розряду, проаналізувати техніку дослідження іскрових розрядів у газах високого тиску з визначенням особливостей вимірювання падіння напруги на електродах та газорозрядному каналі в процесі розширення іскрового каналу;

- провести чисельне дослідження впливу параметрів іскрового розрядника на розвиток іскрового розряду через удосконалену математичну модель розширення іскрового каналу за допомогою розширення області розрахунку до моменту зниження температур газу у струмопровідному каналі до 8000 К, на підставі якої провести дослідження впливу початкового тиску газу у розрядному проміжку на процес газодинамічного розширення іскрового каналу та введення енергії у газорозрядний проміжок;

- розробити техніку експериментально-розрахункового дослідження падіння напруги на електродах та газорозрядному каналі за результатами вимірювання струму та напруги на розрядному проміжку;

- провести дослідження впливу точки підключення ділянки напруги на розвиток перехідних електричних процесів у розрядному колі з навантаженням у вигляді іскрового проміжку;

- провести експериментально-розрахункове дослідження впливу довжини розрядного проміжку та початкового тиску газу на введення енергії в розрядний канал.

*Об'єкт дослідження* – газорозрядні процеси, що відбуваються у іскрових розрядниках високовольтного електророзрядного устаткування.

*Предмет дослідження* – газові розрядники у високовольтному електророзрядному устаткуванні.

**Методи дослідження.** Методи теорії електричних кіл, теорії електромагнітного поля, газодинаміки, плазмохімії, використано для чисельного моделювання. В експериментальних дослідженнях застосовано осцилографування для реєстрації струму, напруги та вимірювання тиску для дослідження впливу тиску та довжини розрядного проміжку на падіння напруги у іскровому розряді. Обробка експериментальних результатів здійснювалась методом найменших квадратів.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

- вперше виявлена залежність енергії, що виділяється у газорозрядному проміжку іскрового розряду, від початкового тиску газу у розрядному проміжку, що дозволило визначати зміну енергетичної ефективності іскрового розряду в умовах зміни початкового тиску газу у розрядному середовищі;

- удосконалено техніку вимірювання енергії, яка вводиться в газорозрядний про-

міжок шляхом урахування впливу точки підключення дільника напруги на розвиток перехідних електричних процесів у розрядному колі з навантаженням у вигляді іскрового проміжку;

- отримано подальший розвиток у фізиці процесу впливу початкового тиску газу у розрядному проміжку на процес газодинамічного розширення іскрового каналу, що дозволило удосконалити технологічні процеси, пов'язані з іскророзрядною обробкою середовища;

- удосконалено техніку експериментально-розрахункового дослідження падіння напруги на електродах та газорозрядному каналі за результатами вимірювання струму та напруги на розрядному проміжку, що дозволило удосконалити електро-розрядне обладнання;

- удосконалено математичну модель розширення іскрового каналу шляхом уточнення електричної провідності газу у області температур до 8000 К, що дозволило провести дослідження процесу розширення іскрового каналу до часу падіння тиску у каналі до тиску зовнішнього середовища.

#### **Практичне значення отриманих результатів:**

- за результатами отриманих досліджень щодо впливу початкового тиску газу на розвиток електророзрядних процесів у іскровому каналі можливо удосконалити електророзрядне обладнання у технологіях формування наночасток, знизити ерозію електродів у електророзрядному обладнанні, підвищити імпульсну потужність електророзрядних джерел випромінювання, підвищити ударну дію іскрових розрядів;

- урахування впливу точки підключення дільника напруги на розвиток перехідних електричних процесів у розрядному колі з навантаженням у вигляді іскрового проміжку дозволяє підвищити точність вимірювання мінімальної енергії запалювання;

- результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі НТУ «ХП» в дисциплінах для студентів спеціальності «141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», курсових проектах, дипломному проектуванні та науково-дослідних роботах, що проводяться на кафедрі електричних апаратів.

**Особистий внесок здобувача.** Наукові положення і результати, які виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: постановка досліджень і проведення експериментів, а також аналіз та інтерпретація одержаних даних. Запропоновано експериментально-розрахунковий метод дослідження падіння напруги на електродах та газорозрядному каналі за результатами вимірювання струму та напруги на розрядному проміжку. Проведено чисельне моделювання розширення іскрового каналу та перехідних процесів у електричному колі з розподіленими параметрами згідно удосконаленої математичної моделі. Обґрунтовано умови моделювання, проведено чисельні дослідження та отримано емпіричну залежність енергії, що вводиться в іскровий розряд, при різних початкових умовах запалювання розряду. Наукові статті за темою дисертації написані здобувачем в співавторстві.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідалися на:

- Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (MicroCAD, м. Харків, Україна, 2019 р., 2020 р.);

- Міжнародному симпозіумі «Проблеми електроенергетики, електротехніки та

електромеханіки» (SIEMA, м. Харків, Україна, 2019 р., 2020 р.);

– XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases and the 10th International Conference on Reactive Plasmas, XXXIV ICPIG & ICRP-10, (Sapporo, Japan, 2019).

**Публікації.** Основний зміст і результати дисертаційної роботи відображено в 8 наукових працях (3 статті та 5 тез доповідей науково-технічних конференцій), з яких 1 стаття в науковому фаховому виданні України, 1 стаття в міжнародному журналі, що входить до наукометричної бази Scopus та належить до квартилю Q1 (зараховується в еквіваленті як 2 статті), 1 стаття в українському науковому журналі, що входить до наукометричної бази Scopus, 2 тези доповідей науково-технічних конференцій, що входять до наукометричної бази Scopus, та 3 тези доповідей науково-технічних конференцій.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації двома мовами, вступу, чотирьох розділів, висновків і додатків. Повний обсяг дисертації становить 152 сторінки, основний текст – 123 сторінки, з них 82 рисунків по тексту, 6 рисунків на окремих 2 сторінках, 4 таблиці по тексту; список використаних джерел інформації зі 128 найменувань на 15 сторінках; 2 додатки на 5 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність дисертації, сформульовано її мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичну значущість роботи. Наведено інформацію про апробацію, публікації і структуру дисертації.

У **першому розділі** на підставі огляду літератури здійснено аналіз механізмів впливу параметрів іскрового розрядника на розвиток іскрового розряду. Зокрема, проведено аналіз впливу початкового тиску газу у іскрових розрядниках на розвиток іскрового розряду. За результатами аналізу літературних джерел визначено, що зростання початкового тиску газу впливає на опір розрядного каналу, на процес введення енергії в іскровий канал, тощо. Разом з тим, не виявлено залежностей, за якими можливо кількісно визначити вплив початкового тиску газу на розвиток іскрового розряду під час його газодинамічного розширення, що не дозволяє обґрунтувати параметри іскрових розрядників. Проведено аналіз впливу довжини іскрового проміжку на розвиток іскрового розряду. За результатами аналізу визначено, що зростання довжини розрядного проміжку призводить до зростання енергії, що виділяється в іскровому розряді. Разом з тим, такий вплив не досліджувався для умов, коли зростання розрядного проміжку супроводжується значним зменшенням розрядного струму. На підставі аналізу існуючих методів вимірювання приелектродного падіння напруги в іскровому розряді визначено неможливість застосування зондових методів через вплив зонда на розвиток іскрового розряду. Застосування методу наближення електродів ускладнено із-за необхідності співнакладання у часі результатів різних вимірювань. Тому існує потреба у розвитку техніки вимірювання приелектродного падіння напруги в іскровому розряді для визначення складової виділення енергії поблизу електродів. Такі дослідження дозволять визначити фактори, що

впливають на електророзрядні процеси, і через вплив на ці фактори удосконалити іскрові розрядники. Проведено аналіз особливостей вимірювання енергії низькоенергетичного іскрового розряду. На підставі цього аналізу виявлено необхідність урахування підключення дільника напруги на іскророзрядний процес, що не здійснено у розглянутих дослідженнях.

У **другому розділі** проведено чисельне дослідження впливу параметрів іскрового розрядника на розвиток іскрового розряду. Процес газодинамічного розширення іскрового каналу розглядається в одновимірній осесиметричній постановці задачі з урахуванням процесу передачі тепла за допомогою теплопровідності в газі та процесу протікання нерівноважних хімічних реакцій. Рівняння газодинаміки для одновимірних задач, які мають циліндричну симетрію, застосовано для дослідження іскророзрядних процесів у багатокомпонентній хімічно активній газовій суміші (молекулярний та атомарний азот), записаної як:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho u)}{\partial r} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial [r(P + \rho u^2)]}{\partial r} = \frac{P}{r}; \quad (2)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \left[ r \left( u \left( \rho \epsilon + \frac{\rho u^2}{2} + P \right) + k_T \frac{dT}{dt} \right) \right]}{\partial r} + \frac{\partial \left[ \rho \epsilon + \frac{\rho u^2}{2} \right]}{\partial t} = \sigma E^2 - W_{em}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial y_i}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r u y_i)}{\partial r} = \omega_i, \quad (4)$$

де  $r$  – радіальна координата;  $u$  – швидкість середовища;  $t$  – час;  $P$  – тиск;  $\rho$  – густина;  $\epsilon$  – внутрішня енергія газу на одиницю маси;  $k_T$  – коефіцієнт теплопровідності;  $T$  – температура;  $E$  – напруженість електричного поля в стовпі розрядного каналу;  $\sigma$  – провідність плазми в каналі;  $W_{em}$  – питома потужність випромінювання;  $y_i$  – молярна концентрація  $i$ -ї компоненти газу;  $\omega_i$  – швидкість зміни концентрації  $i$ -ї компоненти суміші за умов хімічних реакцій.

Система рівнянь (1)-(4) доповнюється рівнянням стану багатокомпонентної газової суміші, рівняннями хімічної кінетики, рівняннями Саха. Іонізація в струмопровідному каналі була розрахована з урахуванням однократної та двократної іонізації газу, де формувалися компоненти  $e$ ,  $N$ ,  $N^+$ ,  $N^{++}$ . Передбачалося, що плазма в каналі є квазінейтральна.

Густина електронів  $n_e$  та температура газу визначалися шляхом розв'язання системи рівнянь:

$$\frac{n_e n_{N^+}}{n N} = \frac{g_{N^+}}{g_N} A T^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{e I_{N^+}}{k T}\right); \quad (5)$$

$$\frac{n_e n_{N^{++}}}{n_{N^+}} = \frac{g_{N^{++}}}{g_{N^+}} A T^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{e I_{N^{++}}}{k T}\right); \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{3}{2} (n_N + n_{N^+} + n_{N^{++}} + n_e) kT + n_{N^+} e I_{N^+} + n_{N^{++}} e I_{N^{++}} + (n_N + n_{N^+} + n_{N^{++}}) \frac{I_N}{2}; \quad (7)$$

$$n_e = n_{N^+} + 2n_{N^{++}}; \quad (8)$$

$$\rho_N = (n_N + n_{N^+} + n_{N^{++}}) Z_N m_{a.i.m}, \quad (9)$$

де  $A = 6,06 \cdot 10^{-21} \text{ см}^{-3} \text{ eV}^{-3/2}$ ;  $g_N, g_{N^+}, g_{N^{++}}$  – статистичні ваги атома азоту та іонів азоту, відповідно;  $I_N$  – енергія дисоціації молекули азоту;  $I_{N^+}, I_{N^{++}}$  – енергія однократної та двократної іонізації атома азоту;  $Z_N$  – масова кількість азоту;  $m_{a.i.m} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ ;  $\rho_N$  – атомна густина азоту;  $e$  – заряд електрону;  $n_e$  – густина електронів;  $n_{N^+}, n_{N^{++}}$  – густина атомів однократної та двократної іонізації;  $n_N$  – густина атомарного азоту;  $k$  – стала Больцмана.

В даній роботі використано вираз провідності плазми у вигляді

$$\sigma = 2,82 \cdot 10^{-4} \frac{n_e}{N \nu \sigma_{tr} + n_e \nu \sigma_{cul}}, \quad (10)$$

де  $n_e$  – густина електронів;  $\sigma_{tr}$  – транспортний переріз пружних зіткнень електронів з нейтральною компонентою плазми;  $\sigma_{cul}$  – переріз кулонівських зіткнень;  $N$  – густина нейтральних компонентів;  $\nu$  – середня теплова швидкість електронів.

Для обчислення електричного перехідного процесу опір  $R_{sp}$  провідного каналу визначається за виразом:

$$R_{sp} = \frac{l_{sp}}{\int_0^{r_{ch}} 2\pi r \sigma dr}, \quad (11)$$

де  $l_{sp}$  – довжина іскрового проміжку;  $r_{ch}$  – максимальний радіус, де температура газу вище 8000 К.

Електричний процес у  $RLC$  колі розраховувався за допомогою рівняння

$$L \frac{di}{dt} + [R_c + R_{sp}] i + \frac{1}{C} \int i dt = U_0, \quad (12)$$

де  $C$  – ємність конденсатора;  $R_c$  – еквівалентний опір розрядного кола;  $L$  – еквівалентна індуктивність розрядного кола.

Передбачалося, що в розрядному каналі присутня лише повздовжня складова електричного поля, і поле рівномірно розподілене по поперечному перерізу каналу. Для моделювання джоулевого нагріву в формулі (3) напруженість електричного поля  $E$  розраховували за допомогою рівняння

$$E = \frac{R_{sp} i}{l_{sp}}. \quad (13)$$

Втрати на випромінювання розраховували за допомогою виразу

$$W_{em} = \frac{\sigma_{SB} T^4}{l_R}, \quad (14)$$

де  $\sigma_{SB}$  – стала Стефана-Больцмана,  $l_R$  – довжина вільного пробігу за Росселандом.

Енергія, що виділяється в циліндричному іскровому каналі, може бути розрахована за рівнянням:



$$W_d = l_{sp} \int_0^t \int_0^{r_{ch}} 2\pi r E^2 \sigma dr dt, \quad (15)$$

де  $l_{sp}$  – довжина іскрового проміжку,  $\sigma$  – провідність газу,  $r$  – радіальна координата,  $E$  – напруженість електричного поля;  $t$  – час.

В граничних умовах приймається, що градієнти термодинамічних параметрів газу на осі іскрового каналу відсутні. Розмір обчислювальної області задавався таким чином, щоб газодинамічні збурення не досягали розрахункової границі. Передбачається у початкових умовах, що відсутні газодинамічні збурення у всій області обчислень.

Чисельне дослідження впливу початкового тиску газу проведено за наступних параметрів розрядного кола. Конденсатори із ємністю  $C = 0,1$  мкФ і  $C = 0,01$  мкФ були застосовані при розрахунку. Перевірялось, чи мають дві різні ємності схожі тенденції впливу тиску. Індуктивність дорівнювала  $L = 2$  мкГн. Початкова напруга на ємності дорівнювала  $U_C = 30$  кВ. Опір кола дорівнював 1 Ом. У початкових умовах область обчислення була заповнена молекулярним азотом. Початкова температура газу була  $T_0 = 300$  К. Початковий тиск газу задавався в межах 1 – 20 атм. Довжина проміжку була встановлена 1 мм.

Було встановлено, що початкове зростання тиску викликає обмеження швидкості розширення іскрового каналу. Це призводить до підвищення температури та електропровідності в електропровідному каналі та підвищення опору іскри (рис. 1), виділеної енергії (рис. 2), напруженості електричного поля (рис. 3).

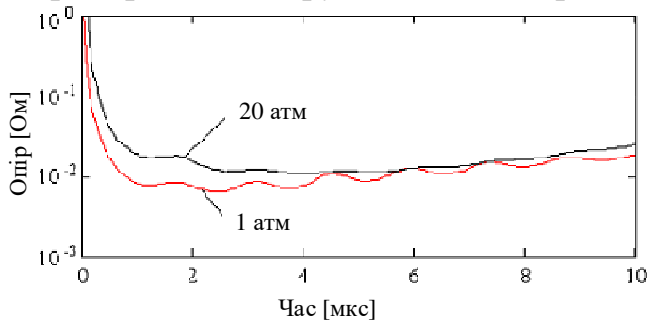


Рисунок 1 – Зміна в часі опору іскри при початковому тиску 1 атм (червона лінія) та 20 атм (чорна лінія) та ємністю  $C = 0,1$  мкФ

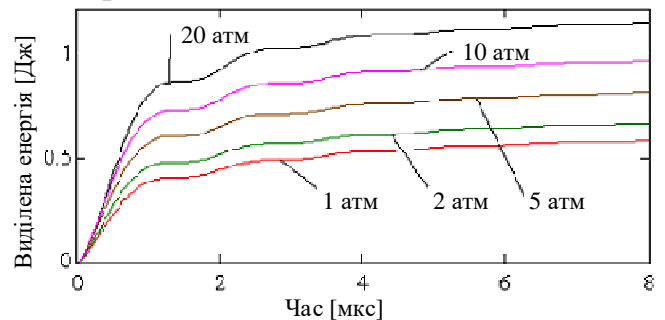


Рисунок 2 – Зміна в часі виділеної енергії при різних початкових тисках та ємності  $C = 0,1$  мкФ

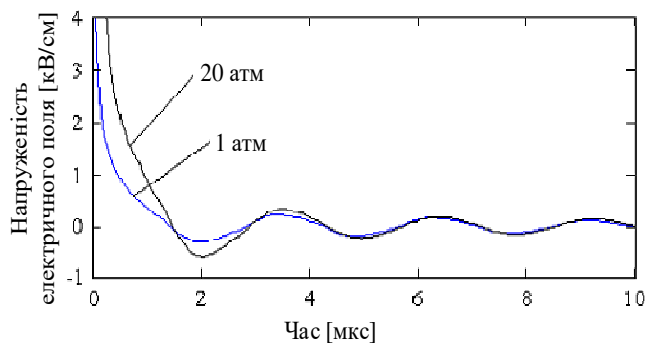


Рисунок 3 – Зміна в часі напруженості електричного поля при різних початкових тисках та ємності  $C = 0,1$  мкФ

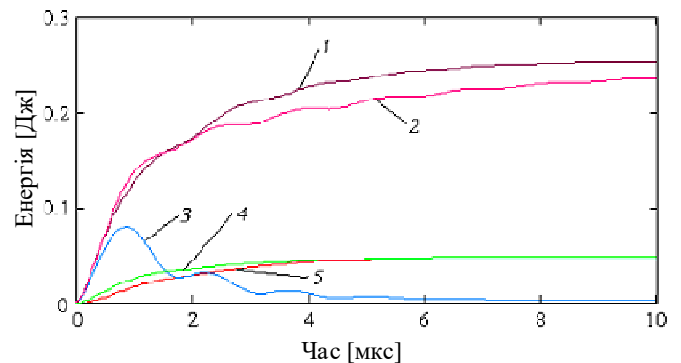


Рисунок 4 – Зміна в часі розподілу енергії при початковому тиску 1 атм та ємністю  $C = 0,1$  мкФ: 1 – енергія, витрачена в процесі дисоціації; 2 – теплова енергія; 3 – енергія, що витрачається на процес іонізації; 4 – кінетична енергія потоку газу; 5 – випромінювана енергія

Але початковий ріст тиску прискорює падіння тиску у іскровому каналі і значно перерозподіляє енергетичний баланс енергії, що виділяється (рис. 4, 5). Отже, ефективність введення енергії швидко зростає, коли початковий тиск зростає. Надзвичайно низький опір іскри порівняно з опором кола викликає надзвичайно низький вплив тиску на розрядний струм. Результати моделювання показали, що зміна ємності конденсатора не призводить до зміни тенденції впливу тиску.

На основі чисельної моделі розширення іскрового каналу проведено порівняння розвитку іскрового розряду в азоті для випадків його ізотермічного і адіабатичного стиснень. З'ясувалося, що при однаковому часі розряду збільшення початкового тиску призводить до зменшення стрибка тиску в ударній хвилі. Збільшення початкового тиску газу призводить до зменшення швидкості ударної хвилі, але зменшення більш виражено при ізотермічному стисненні. У ізотермічно стиснутому газі досягається більш висока температура в іскровому каналі в порівнянні з температурою, досягнутої при адіабатичному стисненні. Більш інтенсивне зростання температури за ударною хвилею відбувається в разі ізотермічного стиснення, але при адіабатичному стисненні абсолютні значення температури за ударною хвилею перевищують відповідні значення при рівних початкових тисках, що відносяться до ізотермічного стиснення. Коли початковий тиск збільшується, опір збільшується при ізотермічному стисненні швидше в порівнянні з адіабатичним стисненням. Збільшення початкового тиску призводить до збільшення енергії, що виділяється в іскровому розряді. Крім того, більш висока кількість енергії, що виділяється, досягається в ізотермічно стисненому газі. У разі ізотермічного стиснення кількість випромінюваної енергії збільшується швидше, і збільшення кінетичної енергії стає більш значним при збільшенні тиску.

Для кількісної оцінки впливу початкового тиску на виділення енергії було застосовано коефіцієнт кореляції. Коефіцієнт динамічної кореляції виражається як:

$$k = \frac{W_{dp}(t)}{W_{di}(t)}, \quad (16)$$

де  $W_{dp}$  – енергія, що вводиться при початковому тиску  $P$  в момент часу  $t$ ;  $W_{di}$  – енергія, що вводиться в момент часу  $t$  при початковому тиску 1 атм.

Порівняння коефіцієнтів при різних початкових тисках та різних умовах стиснення показує, що значення коефіцієнта кореляції незначно різняться (рис. 6). Отримані результати впливу початкового тиску газу на енергію, що виділяється в іскровому каналі, можуть бути використані для інших параметрів розрядного кола. Було запропоновано використовувати середнє значення коефіцієнта кореляції для імітації еквівалентного іскрового навантаження для будь-якого початкового тиску в іскровому розряді. Залежність середнього значення  $k(P)$  коефіцієнта кореляції від тиску

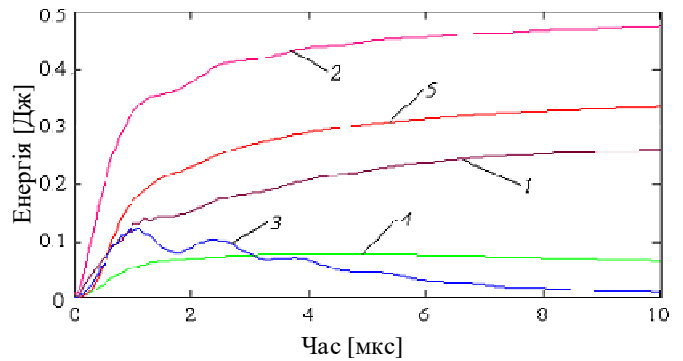


Рисунок 5 – Розподіл енергії від часу при початковому тиску 20 атм та ємністю  $C = 0,1$  мкФ:

1 – енергія, витрачена в процесі дисоціації;  
2 – теплова енергія; 3 – енергія, що витрачається на процес іонізації; 4 – кінетична енергія потоку газу; 5 – випромінювана енергія

може бути виражено як:

$$k(P) = a \cdot P^b + c, \quad (17)$$

де  $a, b, c$  – коефіцієнти.

У разі збільшення тиску в ізотермічному процесі, при температурі 300 К, значення коефіцієнтів  $a, b, c$  в діапазоні тисків від 1 до 20 атм дорівнюють  $a = 0,647, b = 0,32, c = 0,36$ , де у формулі (17) значення тиску  $P$  вказані в атм. Якщо початковий тиск в адіабатичному процесі збільшується, якщо процес

починається при атмосферному тиску і температурі 300 К, коефіцієнти в діапазоні тисків від 1 до 20 атм дорівнюють  $a = 0,359, b = 0,357, c = 0,65$ . Також коефіцієнти кореляції можуть бути визначені з графіків (рис. 7).

Проведено чисельне дослідження впливу довжини розрядного проміжку на розвиток іскрового каналу в азоті. Досліджено іскровий розряд у послідовному  $RLC$ -колі з різними параметрами кола. Перше електричне коло мало наступні параметри, в якому коефіцієнт демпфування становив  $\zeta = 0,38$ . Застосовували ємність  $C = 0,2$  мкФ, індуктивність  $L = 500$  нГн, опір  $R_c = 1,2$  Ом. Напруга заряду становила  $U_c = 3$  кВ. Ці параметри кола відповідають першим умовам моделювання.

Друге коло мало такі параметри, де коефіцієнт демпфування становив  $\zeta = 0,11$ . Застосовували ємність  $C = 0,1$  мкФ, індуктивність  $L = 2$  мкГн, опір  $R_c = 1$  Ом. Напруга заряду становила  $U_c = 30$  кВ. Ці параметри кола відповідають другим умовам моделювання. В обох випадках у молекулярному азоті запалюється іскра з початковою температурою газу  $T_0 = 300$  К і початковим тиском газу 1 атм. Довжина проміжку була в межах від 1 мм до 20 мм.

Чисельними дослідженнями підтверджено, що збільшення довжини розрядного проміжку призводить до зростання енергії, що виділяється в іскровому розряді, зменшення амплітуди розрядного струму та збільшення опору іскрового каналу (рис. 8, 9). Але зміна амплітуди розрядного струму, спричинена зміною довжини проміжку, залежить від параметрів розрядного кола. Отримано, що вплив довжини проміжку на струм розряду посилюється у разі підвищення коефіцієнта демпфування. Помічено, що коли коефіцієнт демпфування дорівнює  $\zeta = 0,38$  на модельованому розрядному колі, збільшення довжини проміжку спричинило зменшення амплітуди струму на 10 % у першому півперіоді розряду. Коли коефіцієнт демпфування  $\zeta = 0,11$ , збільшення довжини

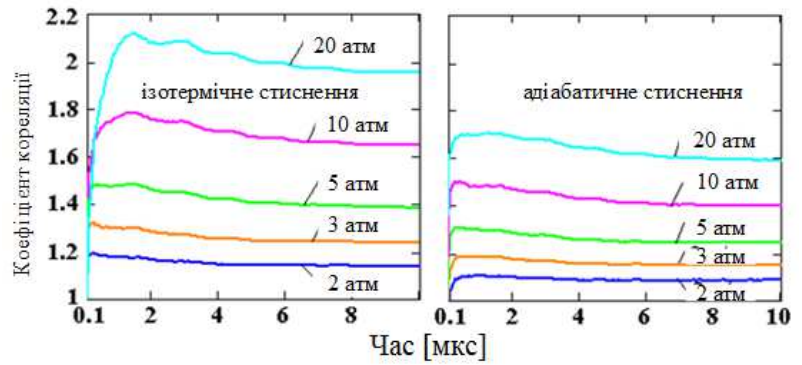


Рисунок 6 – Коефіцієнти кореляції від часу в розрядах конденсаторів з ємністю  $C = 0,1$  мкФ при різних початкових тисках газу:

а – ізотермічне стиснення; б – адіабатичне стиснення

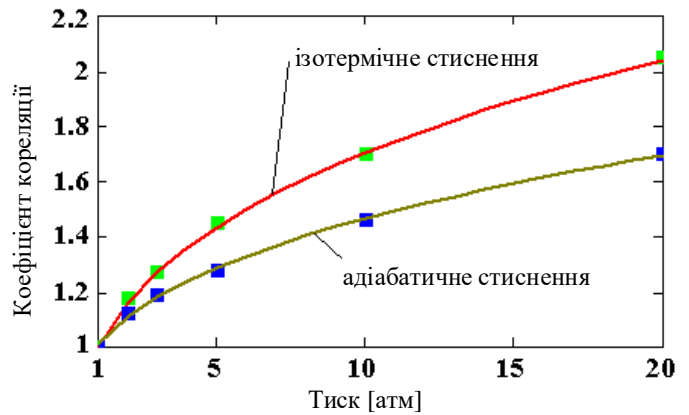


Рисунок 7 – Залежність коефіцієнта кореляції від початкового тиску газу для ізотермічних і адіабатичних стиснень

проміжку у десять разів спричинило зменшення поточної амплітуди лише на 3,65 %. Вплив довжини проміжку на напруженість електричного поля був більш помітним також за умов збільшення коефіцієнта демпфування. Спостерігався незначний вплив довжини проміжку на розширення іскрового каналу. Було встановлено, що енергія, що виділяється в іскровому каналі, і енергія, що випромінюється, практично прямо пропорційні довжині іскрового проміжку (рис. 10). Але відхилення від прямої пропорційності зростає, коли мінімальний опір іскрового каналу та опір розрядного кола мають однакові порядки, а коефіцієнт демпфування високий. З'ясовано, що вплив зміни довжини іскрового проміжку на випромінювану енергію дещо інтенсивніший, ніж вплив на енергію, що виділяється.

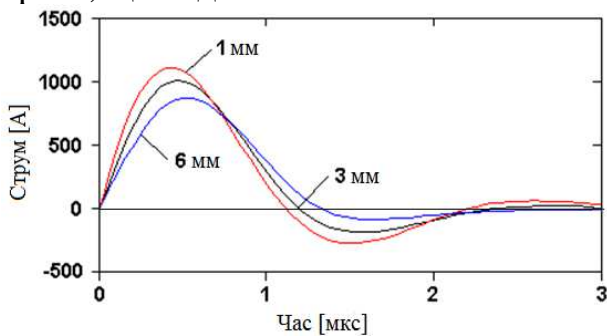


Рисунок 8 – Залежність розрядного струму від часу у першому електричному колі з довжиною проміжку 1 мм, 3 мм та 6 мм

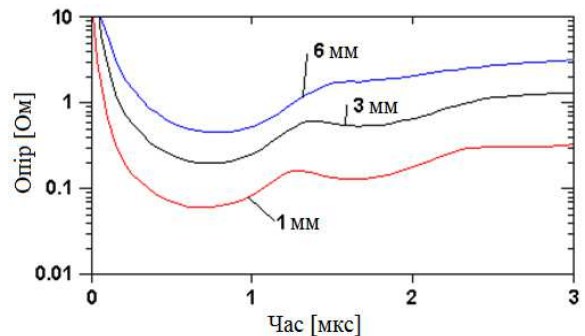


Рисунок 9 – Опір іскрового каналу від часу в першому колі з довжиною проміжку 1 мм, 3 мм і 6 мм

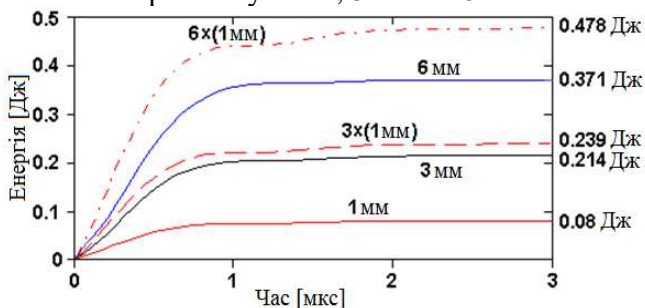


Рисунок 10 – Енергія, що виділяється в іскровому каналі від часу у першому колі з довжиною проміжку 1 мм, 3 мм і 6 мм. Пунктирна лінія позначає трикратне збільшення енергії, що виділяється, у першому колі з довжиною проміжку 1 мм. Лінія крапка та тире позначає збільшення в шість разів

Проведено дослідження падіння напруги на реактивному опорі іскрового каналу, що розширюється. В результаті проведених досліджень встановлено, що падіння напруги на індуктивності іскрового каналу необхідно враховувати при вимірюванні сумарного падіння напруги на катоді і аноді. У той же час, даним процесом можна знехтувати при дослідженні процесу введення енергії в іскровий канал (рис. 11). Проведено чисельне дослідження перехідних електричних про-

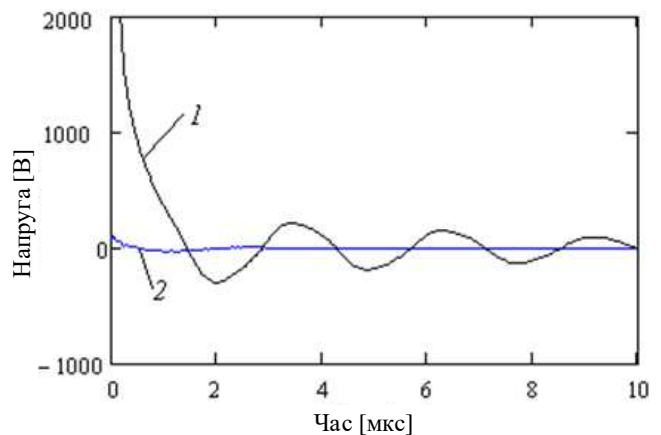


Рисунок 11 – Порівняння падіння напруги через активний (1) та реактивний (2) опір іскрового каналу

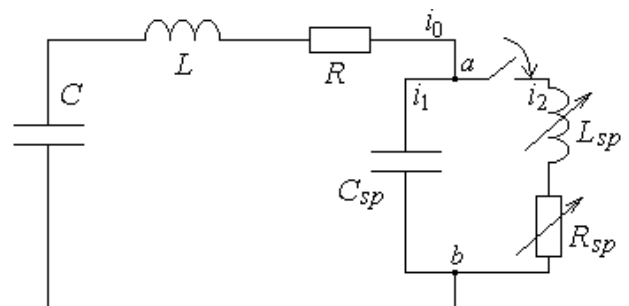


Рисунок 12 – Схема заміщення іскрового розподілу за першою умовою моделювання

цесів в низько-енергетичному розрядному колі для двох розрахункових варіантів. У першому розрахунковому варіанті вважалося, що використовується дільник напруги, який підключений безпосередньо до розрядного проміжку. У другому розрахунковому варіанті передбачалося, що точки підключення дільника віддалені від розрядного проміжку. Також передбачалося, що в другому розрахунковому варіанті ємність дільника значно перевершує ємність газорозрядного проміжку. В обох варіантах використовувалась еквівалентна розрядна схема, представлена на рис. 12.

У першому розрахунковому варіанті приймалося, що  $C + C_{sp} = 15,4$  пФ,  $U_0 = 4840$  В,  $L = 8$  мГн,  $R = 30$  Ом,  $C_{sp} = 3,4$  пФ і  $C = 12$  пФ. При цьому, ємність  $C_{sp}$  складається з суми ємності дільника напруги (3 пФ) і ємності розрядного проміжку (0,4 пФ). Таким чином, на ємності  $C_{sp}$  накопичувалося більше 20 % енергії розряду.

У другому розрахунковому варіанті приймалося, що  $C_{sp} = 3,4$  пФ і  $C = 12$  пФ. Вважалося, що точки підключення дільника напруги віддалені на деяку відстань від розрядного проміжку. В результаті, між дільником напруги і розрядним проміжком з'являється додаткова індуктивність і опір. Тому в розрахунковому варіанті приймалося, що  $L_{sp}$  в рівнянні (19) дорівнює  $L_{sp} = L_{sp}(r) + L_{ad}$ , де  $L_{ad} = 2,5$  мГн. Відповідно, індуктивність  $L = 5,5$  мГн, щоб повна індуктивність не змінилася. Подібним чином приймалося, що  $R_{sp}$  в рівнянні (19) дорівнює  $R_{sp} = R_{sp}(t) + R_{ad}$ , де  $R_{ad} = 9$  Ом. Відповідно, опір  $R = 21$  Ом, щоб повний опір не змінився.

В обох розрахункових варіантах ємність  $C_{sp}$  складалася з суми ємності дільника і іскрового проміжку. У першому розрахунковому варіанті індуктивність  $L_{sp}$  і опір  $R_{sp}$  дорівнювали індуктивності і опору іскрового каналу, відповідно. У другому розрахунковому варіанті індуктивність  $L_{sp}$  складалася з суми індуктивності іскрового каналу і індуктивності ділянки кола від точки підключення дільника до розрядного проміжку. Також у другому розрахунковому варіанті опір  $R_{sp}$  складався з суми опору іскрового каналу і опору ділянки кола від точки підключення дільника до розрядного проміжку.

Перехідні електричні процеси в даному розрядному колі описуються системою рівнянь

$$\frac{1}{C} \int i_0 dt + L \frac{di_0}{dt} + Ri_0 + \frac{1}{C_{sp}} \int i_1 dt = U_0; \quad (18)$$

$$-\frac{1}{C_{sp}} \int i_1 dt + L_{sp} \frac{di_2}{dt} + i_2 \frac{dL_{sp}}{dt} + R_{sp} i_2 = U_0; \quad (19)$$

$$i_0 = i_1 + i_2. \quad (20)$$

У початкових умовах приймалося, що струм на всіх ділянках кола відсутній, а всі ємності заряджені до напруги  $U_0$ .

Індуктивність іскрового каналу розраховувалася за рівнянням індуктивності ділянки провідника круглого перерізу. Дане рівняння має такий вигляд

$$L_{sp}(r) = 2l_{sp} \left[ \ln \left( \frac{4l_{sp}}{2r} \right) - 1 + \frac{4r}{\pi l_{sp}} - \frac{r^2}{2 \cdot l_{sp}^2} \right] \cdot 10^{-7} \text{ [Гн]}. \quad (21)$$

де  $l_{sp}$  – довжина іскрового проміжку;  $r$  – радіус провідника.

Зміна радіуса іскрового каналу в часі виражалась залежністю

$$r(t) = -76,329t + 0,269\sqrt{t} - 1,044 \cdot 10^{-5} [\text{м}]. \quad (22)$$

Виявлено, що для дослідження перехідних процесів в електричному колі, що виникають в низькоенергетичному іскровому розряді, слід використовувати еквівалентні електричні розрядні кола з розподіленими параметрами елементів схеми.

Результати розрахунків струмів, що виникають в вітках електричного кола, представлені на рис. 13. В отриманих результатах спостерігається, що через 10-20 нс від початку розвитку розряду струм  $i_2$ , що протікає через іскровий проміжок, починає співпадати зі струмом  $i_0$ , що протікає через конденсатор  $C$ . Також за цей час струм  $i_1$ , що протікає через ємність  $C_{sp}$ , практично зникає. Так як в досліджуваному варіанті розрядний струм протікає понад 1000 нс, то даним впливом можна знехтувати. Даний результат дає підставу вважати, що підключення дільника напруги безпосередньо до іскрового проміжку не призводить до суттєвого спотворення результатів вимірювань.

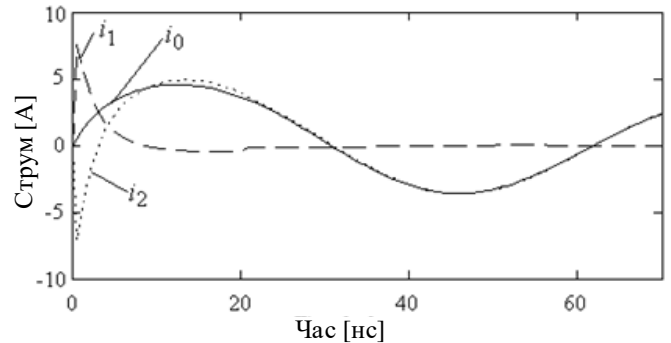


Рисунок 13 – Розрядні струми в вітках кола в першому розрахунковому варіанті

Згідно з результатами чисельних досліджень, збільшення відхилення струму, що протікає через розрядний конденсатор, від струму, що протікає через розрядний проміжок, виявлено в разі збільшення відстані між точками підключення високовольтного зонда і наконечників розрядних електродів.

Порівняння струмів  $i_0$  і  $i_2$ , що виникають у другому розрахунковому варіанті, представлено на рис. 14. Також представлений струм  $i_{RLC}$ , що виникає в колі з зосередженими параметрами.

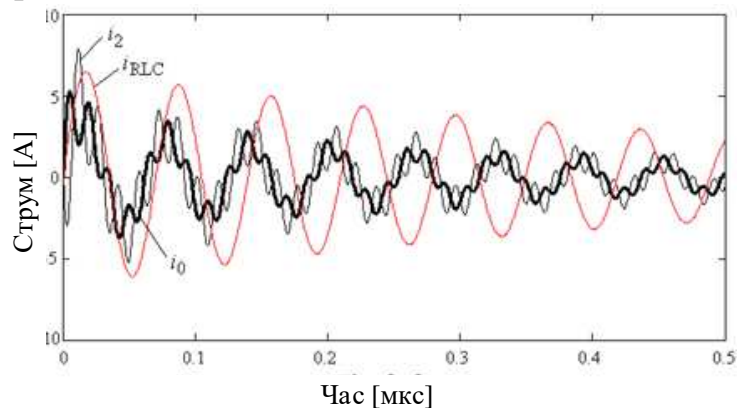


Рисунок 14 – Порівняння струмів  $i_0$  і  $i_2$ , що виникають у другому розрахунковому варіанті і струму  $i_{RLC}$ , що виникає в колі з зосередженими параметрами

Виявлено, що відхилення розрядного струму реального електричного кола від згасаючих гармонійних коливань ідеального послідовного кола  $RLC$  обумовлено підключенням високовольтного зонда на відстані від газорозрядного проміжку.

У **третьому розділі** удосконалено техніку дослідження приелектродного падіння напруги в іскрі на стадії її газодинамічного розширення в газах високого тиску, що дозволяє спростити техніку проведення дослідження. Метод заснований на вимірюванні напруги на іскровому проміжку і розрахунковому визначенні напруженості електричного поля і нелінійної індуктивності іскрового каналу по експериментальній кривій розрядного струму.

В результаті, зміна приелектродного падіння напруги в часі  $a(t)$  визначається за виразом:

$$a(t) = U - El_{sp} - \frac{dL_{sp}i}{dt}, \quad (23)$$

де  $U$  й  $i$  – вимірні миттєві значення напруги і струму на іскровому проміжку;  $E$  – поточна розрахункова напруженість електричного поля в іскровому каналі;  $l_{sp}$  – довжина іскрового проміжку;  $L_{sp}$  – поточна розрахункова індуктивність іскрового каналу.

Дослідженнями по експериментально-розрахунковому методу визначення приелектродного падіння напруги в іскрі підтверджено підвищене падіння напруги в приелектродних областях в період зростання розрядного струму і встановлення напруги, близької до стаціонарної дуги в області падіння похідної розрядного струму (рис. 15).

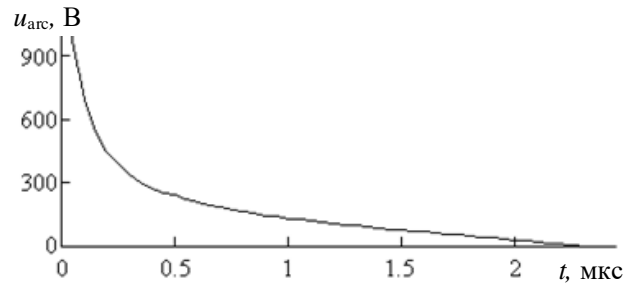


Рисунок 15 – Розрахункове падіння напруги в газорозрядному каналі  $u_{arc}$

У **четвертому розділі** представлено результати експериментальних та чисельних досліджень впливу тиску і довжини іскрового проміжку на розподіл енергії у іскровому розряді. Досліджувався розряд конденсатора на іскровому проміжку. При цьому, забезпечено умову пробиття розрядного проміжку за сталої напруги. Для цього використано відому залежність напруги  $u_{br}$  пробиття у вигляді

$$u_{br} \sim P \cdot l_{sp}, \quad (24)$$

де  $p$  – початковий тиск газу;  $l_{sp}$  – довжина розрядного проміжку.

Для проведення досліджень збиралась установка згідно схеми (рис. 16). Для зміни початкового тиску, розрядний проміжок 1 розміщувався у камері високого тиску 2. Камера тиску з'єднувалась з газовим балоном високого тиску 3. Подавання стисненого повітря здійснювалось через редуктор 4. Вимірювання початкового тиску газу у розрядній порожнині здійснювалось манометром 5. Випуск газу з порожнини здійснювався через кран 6. Вимірювання напруги здійснювалось компенсованим дільником напруги 7. Вимірювання розрядного струму здійснювалось датчиком струму 8 на ефекті Холла. Заряджання ємності  $C$  відбувалось від підвищувального трансформатора  $T_2$ , з'єднаного у первинному колі з лабораторним автотрансформатором  $T_1$ , а вторинна обмотка цього трансформатора через випрямний діод  $VD$  та обмежувальний резистор  $R_{ch}$  з'єднувалась з ємністю  $C$ . З'єднання між ємністю та іскровим проміжком здійснювалось літцендратом. Окремо створювалась точка підключення дільника напруги у проміжку між ємністю та іскровим проміжком.

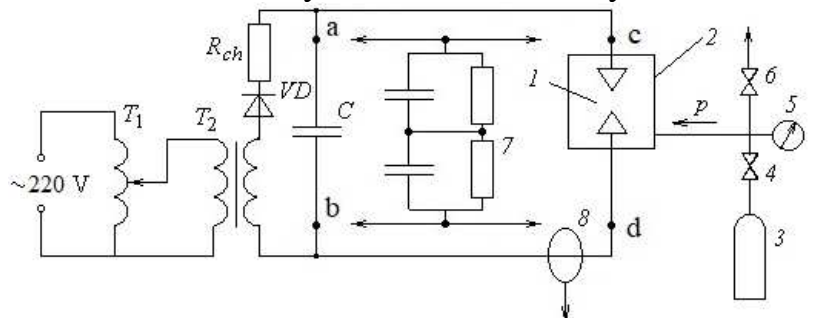


Рисунок 16 – Схема проведення досліджень

Як розрядну ємність використано конденсатор типу K15-10 ємністю 4700 пФ  $\pm$  30 %. Розрядні електроди виконані зі сталі. Як датчик напруги використано дільник напруги фірми PINTEK типу HVP-40. Для вимірювання струму використано датчик

струму фірми Honeywell типу CSNM191. Електричне з'єднання між конденсатором та іскровим проміжком здійснювалось літцендратом типу ЛЕШО 1075×0,071 мм, що знизило вплив скін-ефекту на опір електричного кола. Загальна довжина літцендрату дорівнювала 1,5 м. Реєстрування сигналів з датчиків струму та напруги здійснювались на осцилографі фірми Rigol типу DS1102E.

Зміна довжини проміжку відбувалась у діапазоні 1–2 мм. Абсолютний тиск газу у проміжку регулювався у діапазоні від 1 атм до 2 атм. Вимірювання довжини розрядного проміжку здійснювалось штанген-циркулем з точністю вимірювання  $\pm 0,1$  мм. Вимірювання тиску газу здійснювалось манометром ДМ05063 з класом точності 2,5. Опір зарядного резистору дорівнював 43 кОм. Враховуючи високий розкид фактичної ємності розрядного конденсатора, здійснювалось вимірювання фактичної його ємності цифровим вимірювачем імітансу E7-22.

Вигляд розрядного кола з засобами вимірювання представлено на рис. 17.

За результатами дослідження виявлено вплив точки підключення дільника напруги на розрядний струм. Зокрема, результати вимірювання струму у розрядному колі та напруги у різних точках підключення відображено на рис. 18, 19. У наведених осцилограмах чутливість за напругою дорівнює 2,5 кВ/поділ, за струмом – 180 А/поділ. За результатами вимірювань спостерігаємо наявність струму, що є характерним для коливального затухаючого розряду ємності.

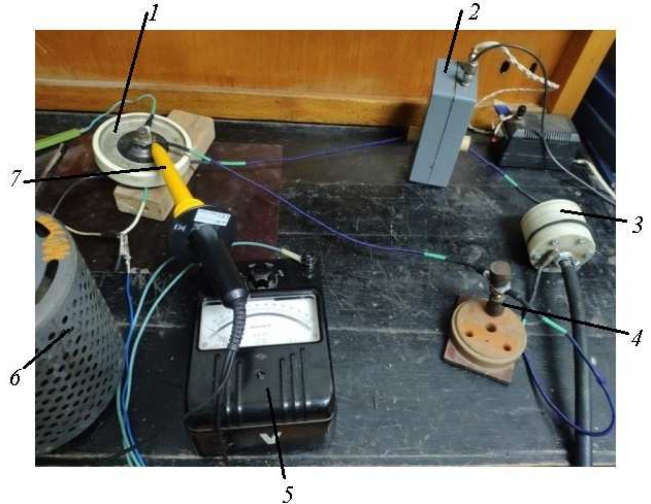


Рисунок 17 – Розрядне коло з засобами вимірювання:

1 – конденсатор, 2 – датчик струму; 3 – розрядний проміжок, що розміщений у замкненій порожнині; 4 – проміжна точка підключення дільника напруги; 5 – вольтметр; 6 – ЛАТР; 7 – високовольтний щуп з дільником напруги

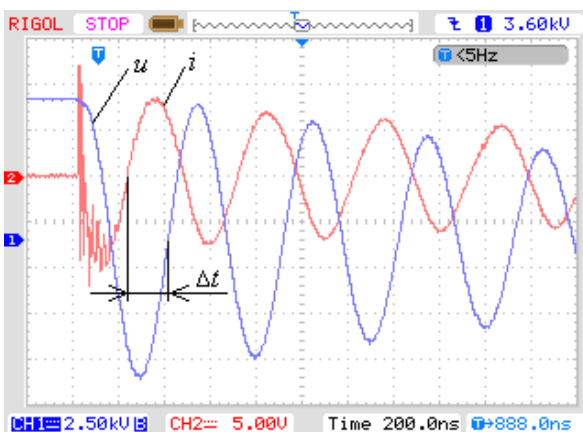


Рисунок 18 – Осцилограми струму  $i$  у розрядному колі та напруги  $u$  у разі підключення дільника напруги до конденсатора

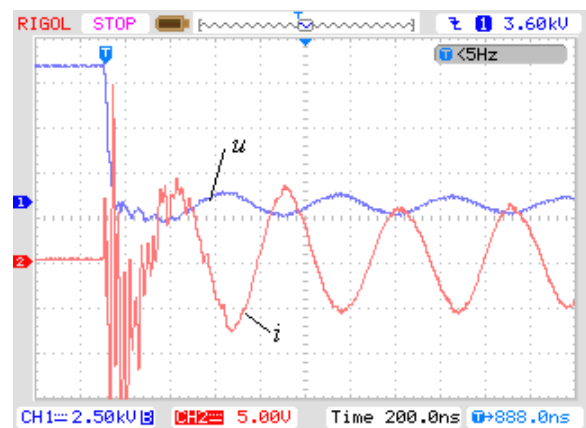


Рисунок 19 – Осцилограми струму  $i$  у розрядному колі та напруги  $u$  у разі підключення дільника напруги до іскрового проміжку

Зафіксовано, що підключення дільника напруги до різних точок призвело до зміни розрядного струму. На основну гармоніку струму, що відображає затухаючий розряд, накладаються вищі гармоніки. При цьому, найменша амплітуда вищих гармо-



нік виникає у разі підключення дільника напруги безпосередньо до розрядного конденсатора.

Результати вимірювання струму, що виникає у колі під час розряду на проміжок довжиною 1 мм, де початковий тиск газу дорівнював 2 атм, представлено на рис. 20. Під час вимірювань дільник напруги підключався до ємності. Результати вимірювання струму та напруги за довжиною проміжку 2 мм та початкового тиску 1 атм представлено на рис. 21.

З отриманих результатів визначено, що за однакової напруги заряджання конденсатора найбільша амплітуда струму досягається на меншому розрядному проміжку, не зважаючи на зростання початкового тиску газу у газорозрядному середовищі.

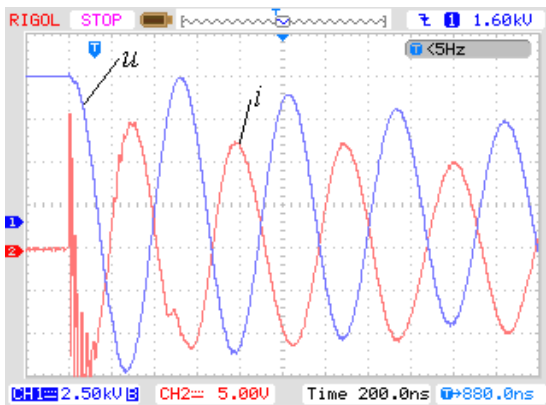


Рисунок 20 – Осцилограми струму  $i$  у розрядному колі та напруги  $u$  за довжини проміжку 1 мм та початкового тиску 2 атм

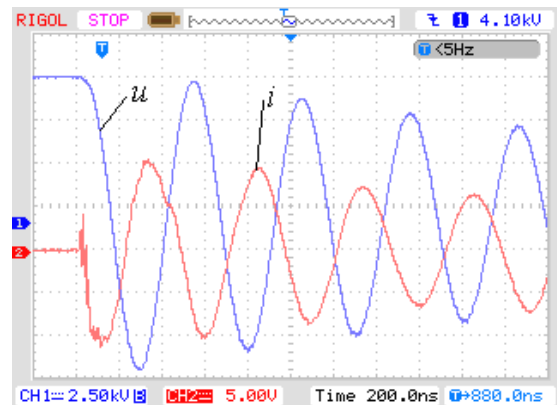


Рисунок 21 – Осцилограми струму  $i$  у розрядному колі та напруги  $u$  за довжини проміжку 2 мм та початкового тиску 1 атм

Для кількісної оцінки енергії іскрового розряду, що вводиться в розрядний проміжок, застосована чисельна модель, що описана в розділі 2.

Результати розрахунку енергії, що вводиться в іскровий канал та опору іскрового каналу представлено на рис. 22, 23.

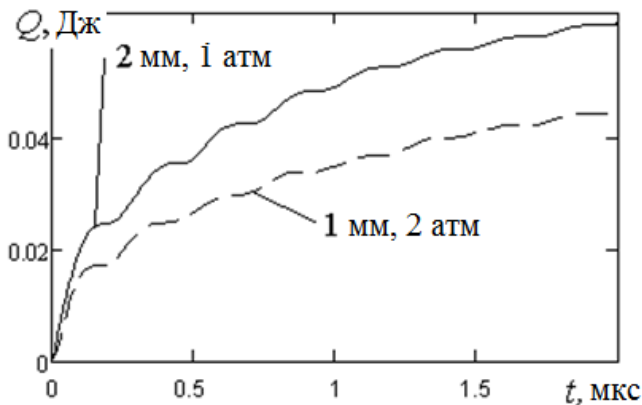


Рисунок 22 – Зміна енергії, що вводиться в іскровий канал у часі

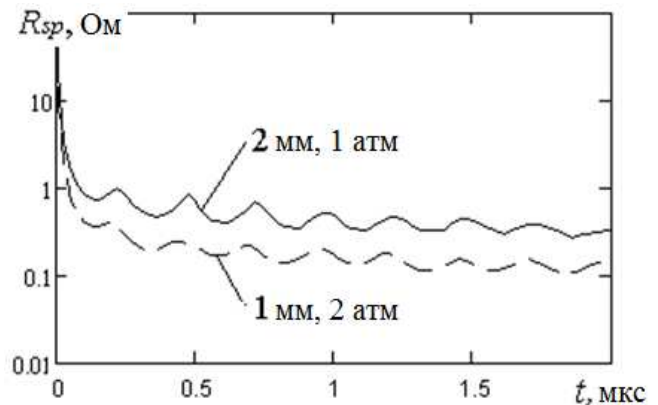


Рисунок 23 – Зміна опору іскрового каналу у часі

За результатами чисельних досліджень спостерігаємо, що зростання довжини проміжку в умовах пропорційного зниження тиску призводить до зростання енергії, що вводиться в іскровий канал (рис. 22). Слід зазначити, що таке зростання відбувається не зважаючи на зниження амплітуди розрядного струму у разі збільшення довжини проміжку (рис. 20, 21).

У додатках наведено акти впровадження результатів дисертаційної роботи та список публікацій здобувача.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу обґрунтування параметрів іскрових розрядників для високовольтного електророзрядного устаткування на підставі виявлення впливу довжини розрядного проміжку та початкового тиску газу на газорозрядні процеси, та отримані результати:

1. Проведено аналіз впливу параметрів іскрового розрядника на розвиток іскрового розряду. На основі аналізу літератури щодо теоретичних та експериментальних досліджень іскрового розрядка отримано відсутність виявленого кількісного зв'язку щодо впливу довжини розрядного проміжку та початкового тиску газу на газорозрядні процеси. Цим ускладнюється обґрунтування параметрів іскрових розрядників для високовольтного електророзрядного устаткування.

2. Проведено чисельне дослідження впливу параметрів іскрового розрядника на розвиток іскрового розряду. Врахування зіткнень електронів з атомами у рівнянні провідності дозволило розширити область застосування математичної моделі розширення іскрового каналу в умовах зниження температури у струмопровідному каналі іскри до 8000 К. За результатами численних досліджень розширення іскрового каналу у азоті за незмінних параметрів електричного кола, але змінним початковим тиском виявлено нелінійне зростання енергії, що вводиться в іскровий канал, яке може бути представлено через коефіцієнт  $k(P)=a \cdot P^b+c$ , де  $a = 0,647$ ,  $b = 0,32$ ,  $c = 0,36$ . Застосування коефіцієнту дозволяє кількісно визначити зміни у енергії, що вводиться у іскровий канал, залежно від зміни тиску. При цьому виявлено зростання енергії, що виділяється в іскровому розряді, зменшення амплітуди розрядного струму та збільшення опору іскрового каналу.

3. За результатами чисельних досліджень розширення іскрового каналу у азоті виявлено, що зростання початкового тиску газу у розрядному проміжку призводить до перерозподілу балансу енергії, що виділяється в іскрі, пов'язаної з процесами іонізації, дисоціації, випромінювання, перетворюється у тепло та у кінетичну енергію газового потоку. Зокрема, виявлено різке зростання енергії, що випромінюється, у разі зростання початкового тиску газу. Виявлено, що зміна довжини проміжку впливає більше на введення енергії в розрядний канал, ніж зміна початкового тиску. Зокрема, в умовах проведених досліджень у разі зростання довжини проміжку у 2 рази з одночасним зниженням тиску у 2 рази відбулося зростання енергії, що вводиться в іскровий канал, у 1,35 рази.

4. Для вивчення перехідних процесів в електричному колі, що виникають в низькоенергетичному іскровому розряді, слід використовувати еквівалентні електричні розрядні кола з розподіленими параметрами елементів схеми. Згідно з результатами чисельних досліджень, збільшення відхилення струму, що протікає через розрядний конденсатор, від струму, що протікає через розрядний проміжок, виявлено в разі збільшення відстані між точками підключення високовольтного зонда і наконечників розрядних електродів.

5. Удосконалено техніку експериментально-розрахункового дослідження приелектродного падіння напруги в іскрі на стадії її газодинамічного розширення в газах високого тиску, що дозволяє спростити техніку проведення дослідження. Техніка вимірювання полягає у вимірюванні напруги на іскровому проміжку і розрахунковому визначенні напруженості електричного поля і нелінійної індуктивності іскрового каналу по експериментальній кривій розрядного струму.

6. На підставі експериментально-розрахункових досліджень впливу довжини розрядного проміжку та початкового тиску газу на введення енергії в розрядний канал виявлено, що фактор довжини проміжку впливає більше на введення енергії в розрядний канал, ніж фактор початкового тиску. Зокрема, в умовах проведених досліджень у разі зростання довжини проміжку у 2 рази з одночасним зниженням тиску у 2 рази відбулося зростання енергії, що вводиться в іскровий канал, у 1,35 рази.

Основні науково-технічні результати дисертаційної роботи впроваджені в навчальному процесі НТУ «ХП» в дисциплінах спеціальності «141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», дипломному проектуванні та науково-дослідних роботах, що проводяться на кафедрі електричні апарати.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Варшамова И.С. Усовершенствование техники исследования приэлектродного падения напряжения в искровом разряде в газах / К.В. Коротченко, И.С. Варшамова // Вісник НТУ «ХП» серія : Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ «ХП». – 2019. – № 2. – С. 57-63.

*Здобувачкою обґрунтовано методика та план проведення досліджень, проведено обробку результатів вимірювання, проведено розрахунок енергії, що вводиться в іскровий розряд, за відмінних початкових умов запалювання розряду.*

2. Varshamova I.S. Numerical simulation of initial pressure effect on energy input in spark discharge in nitrogen / K.V. Korytchenko, R.S. Tomashevskiy, I.S. Varshamova, D.P. Dubinin, A.A. Lisnyak, V.O. Lipovyi // Вопросы атомной науки и техники. – Харків: ННЦ «ХФТІ». – 2019. – № 4 (122). – С. 116-119.

*Здобувачка удосконалила математичну модель розширення іскрового каналу, обробила результати числових досліджень, за якими виявила вплив початкового тиску газу у розрядному проміжку на процес газодинамічного розширення іскрового каналу.*

3. Varshamova I.S. Numerical investigation of energy deposition in spark discharge in adiabatically and isothermally compressed nitrogen / K.V. Korytchenko, R.S. Tomashevskiy, I.S. Varshamova, D.V. Meshkov, D. Samoilenko // Japanese Journal of Applied Physics. – Japanese. – 2020. – № 59. – SHHC04. doi.org/10.35848/1347-4065/ab72cc.

*Здобувачка обґрунтувала умови моделювання, провела чисельні дослідження та отримала емпіричну залежність енергії, що вводиться в іскровий розряд, від початкового тиску газу.*

4. Varshamova I.S. Investigation of voltage drop across reactance of expanding spark channel / K. Korytchenko, R. Tomashevskiy, I. Varshamova, I. Polyakov, I. Hrytsyna, M. Chyrkina // 2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power

Systems (IEPS) / Istanbul, Turkey. – 2020. – pp. 323-326, doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263221.

*Здобувачка обґрунтувала вихідні умови моделювання та обґрунтувала вираз, за яким враховано змінний реактивний опір іскрового розряду, розробила математичну модель розрахунку перехідних процесів у електричному колі з розподіленими параметрами кола.*

5. Varshamova I.S. Challenges of energy measurements of low-energy spark discharges / K. Korytchenko, R. Tomashevskiy, I. Varshamova, S. Essmann, D. Dubinin, K. Ostapov // 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPI Week). October 5-10, 2020. – Kharkiv, Ukraine. – Pp. 421-424. doi: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250172.

*Здобувачка брала участь у розробці математичної моделі перехідних процесів, здійснила обробку результатів моделювання та виявила вплив точки підключення дільника напруги на розрядні процеси.*

6. Варшамова І.С. Метод визначення приелектродного падіння потенціалу в іскрі на стадії газодинамічного розширення в газах високого тиску // К.В. Коритченко, І.С. Варшамова // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVII міжн. наук.-практична конф. (MicroCAD-2019), 15-17 травня: тези доп. / Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – С. 88.

*Здобувачка запропонувала експериментально-розрахунковий метод дослідження падіння напруги на електродах та газорозрядному каналі за результатами вимірювання струму та напруги на розрядному проміжку.*

7. Varshamova I.S. Numerical investigation of initial pressure influence on energy deposition in spark discharge in nitrogen // K. Korytchenko, R. Tomashevskiy, I. Varshamova, D. Meshkov // XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases & 10th International Conference on Reactive Plasmas, July 14-19, 2019 / Sapporo, Hokkaido, Japan. – 2019.

*Здобувачка удосконалила математичну модель розширення іскрового каналу, обробила результати числових досліджень, за якими виявила вплив початого тиску газу у розрядному проміжку на введення енергії в іскровий канал.*

8. Варшамова І.С. Чисельне дослідження впливу початкового тиску на введення енергії в іскровий розряд в азоті // К.В. Коритченко, І.С. Варшамова // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: XXVIII міжн. наук.-практична конф. (microCAD-2020), 28-30 жовтня 2020 р. : тези доп. / Харків: НТУ «ХПІ». – 2020. – С. 64.

*Здобувачка обґрунтувала умови моделювання, провела чисельні дослідження та отримала емпіричну залежність енергії, що вводиться в іскровий розряд, від початкового тиску газу.*

## АНОТАЦІЇ

**Варшамова І.С. Обґрунтування параметрів іскрового розрядника для високовольтного газорозрядного устаткування.** На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів. – Національний

технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, 2021 р.

Дисертаційна робота присвячена обґрунтуванню параметрів іскрових розрядників для високовольтного електророзрядного устаткування на підставі виявлення впливу довжини розрядного проміжку та початкового тиску газу на газорозрядні процеси.

Проведено аналіз впливу початкового тиску газу та довжини іскрового проміжку у іскрових розрядниках на розвиток іскрового розряду. Проведено аналіз особливостей вимірювання енергії низькоенергетичного іскрового розряду. Розроблена чисельна модель розширення іскрового каналу. На основі чисельної моделі розширення іскрового каналу проведено порівняння еволюції іскрового розряду в азоті для випадків його ізотермічного і адіабатичного стиснень. Для кількісної оцінки впливу початкового тиску на виділення енергії був введений коефіцієнт кореляції. Удосконалено техніку дослідження приелектродного падіння напруги в іскрі на стадії її газодинамічного розширення в газах високого тиску.

*Ключові слова:* довжина розрядного проміжку, початковий тиск газу, іскрові розрядники, електророзрядне устаткування, енергія, іскровий канал, іскровий розряд, коефіцієнт кореляції.

**Варшамова И.С. Обоснование параметров искрового разрядника для высоковольтного газоразрядного оборудования.** На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.13 – техника сильных электрических и магнитных полей. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, 2021 г.

Диссертация посвящена обоснованию параметров искровых разрядников для высоковольтного электроразрядного оборудования на основании выявления влияния длины разрядного промежутка и начального давления газа на газоразрядные процессы.

Проведен анализ влияния начального давления газа и длины искрового промежутка в искровых разрядниках на развитие искрового разряда, а также анализ особенностей измерения энергии низкоэнергетического искрового разряда. Разработана численная модель расширения искрового канала. На основе численной модели расширения искрового канала проведено сравнение развития искрового разряда в азоте для случаев его изотермического и адиабатического сжатий. Для количественной оценки влияния начального давления на выделение энергии был введен коэффициент корреляции. Усовершенствована техника исследования приэлектродного падения напряжения в искре на стадии ее газодинамического расширения в газах высокого давления.

*Ключевые слова:* длина разрядного промежутка, начальное давление газа, искровые разрядники, электроразрядное оборудование, энергия, искровой канал, искровой разряд, коэффициент корреляции.

**Varshamova I.S. Substantiation of spark arrester parameters for high-voltage gas-discharge equipment.** Manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.09.13 – technique of strong electric and magnetic fields. – National Technical University «Kharkiv

Polytechnic Institute», Kharkiv, 2021.

The thesis is devoted to the substantiation of the parameters of spark arresters for high-voltage electrical discharge equipment on the basis of revealing the influence of the length of the discharge gap and the initial gas pressure on gas-discharge processes.

The analysis of the influence of the initial gas pressure and the length of the spark gap in spark gaps on the development of the spark discharge, as well as the analysis of the features of measuring the energy of a low-energy spark discharge is carried out. A numerical model of the spark channel expansion is developed. On the basis of a numerical model of the spark channel expansion, a comparison is made of the development of a spark discharge in nitrogen for the cases of its isothermal and adiabatic compression. To quantify the effect of the initial pressure of energy release, a correlation coefficient is introduced. The technique of studying the near-electrode voltage drop in a spark at the stage of its gas-dynamic expansion in high-pressure gases has been improved.

*Key words:* length of the discharge gap, initial gas pressure, spark arresters, electric discharge equipment, energy, spark channel, spark discharge, correlation coefficient.

