

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ПОГОДЖЕНО
Директор ННІ енергетики,
автоматики і енергозбереження

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки
та електротехнологій

_____ /Каплун В.В./
(підпис)

_____ / Окушко
О.В./
(підпис)

«_____» _____ 2026 р.

«_____» _____ 2026 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему: «ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОВЗНОГО РОЗРЯДУ ПРИ
СПАЛЮВАННІ ВУГЛЕВОДНЕВОЇ СУМІШІ»**

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Троханяк В. І.
(ПІБ)

**Керівник магістерської
кваліфікаційної роботи**

Д.Т.Н. професор
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Заблудський М.М.
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Генералов Б.М.
(ПІБ)

КИЇВ – 2026

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри електротехніки,
електромеханіки та електротехнологій
канд. техн. наук, доц. _____ Окушко О.В.
“ _____ ” _____ 2024 року

ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧУ

Генералову Богдану Максимовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської роботи «Дослідження електричного ковзного розряду при спалюванні вуглеводневої суміші» затверджена наказом ректора Національного університету біоресурсів і природокористування України від 18.11.2024 р. № 2058 «С».

Термін подання завершеної роботи на кафедру 22.05.2026р
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської роботи: –

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Всебічне вивчення патентно-кон'юктурної та прикладної бази закордонного і вітчизняного досвіду з енергоощадних технологій та обладнання, в яких використовуються електромагнітні системи супроводження горіння пальної суміші.
2. Розробка удосконаленої електромагнітної системи супроводження горіння вуглеводневої суміші.
3. Дослідження електродинамічних процесів електричного ковзного розряду при спалюванні вуглеводневої суміші.

Перелік графічного матеріалу: презентація виконана в програмному середовищі MS Power Point_, наочні матеріали з результатами дослідження

Дата видачі завдання «18» листопада 2024 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

_____ Заблудський М.М.
(підпис) (ПІБ)

Завдання прийняв до виконання

_____ Генералов Б.М.
(підпис) (ПІБ)

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота: 56с., 2 табл., 26 рис., 27 джерел

Актуальність теми. Зміна кліматичних умов, забруднення довкілля та обмеженість традиційних джерел енергії ставлять перед людством складні виклики щодо пошуку ефективних, екологічно безпечних та стійких енергетичних рішень. Сучасні вимоги до ефективності та безпеки процесів згоряння пального в різноманітних сферах виробництва вимагають удосконалення систем контролю та оптимізації цих процесів.

Одним із перспективних напрямків в цьому контексті є застосування електромагнітних систем для супроводження горіння пальної повітряно-водно-вуглеводневогазової суміші. Дослідження в цій області стає надзвичайно актуальним, з огляду на постійний розвиток технологій, необхідність ефективного використання паливних ресурсів і появу нових вимог щодо екологічної безпеки.

Мета дослідження Основною метою даного дослідження є вивчення можливостей застосування електромагнітних систем для оптимізації процесів горіння пальної повітряно-водно-вуглеводневогазової суміші, а також аналіз впливу таких систем на забруднення довкілля та підвищення ефективності енергетичних процесів.

Об'єктом дослідження є процеси горіння пальної повітряно-водно-вуглеводневогазової суміші в умовах впливу електромагнітних полів, а також вивчення взаємодії між електромагнітними полями та фізико-хімічними процесами, що відбуваються під час горіння.

Предметом дослідження є ефекти електричного ковзного розряду при спалюванні вуглеводневої суміші, а також електромагнітні системи, призначені для супроводження горіння пальної повітряно-водно-вуглеводневогазової суміші.

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ СПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕВОДНЕВИХ СУМІШЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЙ

1.1 Вступ та актуальність проблеми	3
1.2 Характеристика процесів горіння вуглеводневих сумішей	8
1.3 Електротехнологічні методи впливу на горіння.....	9
1.4 Ефективність та переваги використання електротехнологій.....	10
1.5 Аналіз існуючих статей і патентів	11
Висновки до розділу.....	13

РОЗДІЛ 2 ТЕОРИТИЧНІ АСПЕКТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ РОЗРЯДІВ

2.1 Класифікація розрядів у газах.....	15
2.1.1 Тліючий розряд.....	16
2.1.2 Іскровий розряд.....	17
2.1.3 Дуговий розряд.....	18
2.1.4 Коронний розряд.....	18
2.2 Виникнення позитивної та негативної корони.....	19
2.3 Коронні розряди при атмосферному тиску	20
2.4 Фізичні аспекти коронних розрядів	20
2.5 Ковзні розряди.....	26
Висновки до розділу.....	29

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА СТЕНДУ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЕЛЕКТРОПРИВОДА ВЕНТИЛЯТОРА

3.1 Розроблення експериментальної установки.....	31
3.2 Трансформатор електронний Neonpro 12000/30	35
3.3 Розробка електропривода вентилятора.....	37
3.3.1 Габаритні характеристики двигуна 6АМУ160М8.....	37
3.3.2 Широтно-імпульсного перетворювача.....	38
3.3.3 Комп'ютерне моделювання електропривода.....	39
Висновки до розділу.....	41

	5
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПОРІВНЯННЯ З МАТЕМАТИЧНОЮ МОДЕЛЛЮ	
4.1 Теоретична частина результатів експериментальних досліджень.....	42
4.2 Аналіз результатів експериментальних досліджень.....	43
ВИСНОВКИ.....	51
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	53

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

α – іонізаційний коефіцієнт Таунсенда,

y – ефективний коефіцієнт вторинної емісії

$\Phi/\text{см}^2$ – фарад на квадратний сантиметр.

ШИМ – Широтно-імпульсний перетворювач

r – радіус паралельних провідників

ВАХ – Вольт-амперна характеристика

Δ - товщина діелектричного матеріалу

$\epsilon_0 \epsilon$ - абсолютна та відносна діелектричні проникності

n – щільність носіїв

μ – рухливість носіїв заряду

v – напруга між циліндрами

v_k – пороговим потенціалом запалювання

$U_{1,2}$ – амплітуди послідовних піків

T_d – період коливань

FFT аналіз – Fast Fourier Transform

RLC контур – електричне коло, що складається з резистора, котушки індуктивності та конденсатора

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ СПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕВОДНЕВИХ СУМІШЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЙ

1.1. Вступ та актуальність проблеми

Сучасний розвиток енергетики та промислових теплотехнологій характеризується зростанням вимог до енергоефективності, екологічної безпеки та керованості процесів спалювання палива. В умовах обмеженості традиційних паливно-енергетичних ресурсів та посилення екологічних нормативів особливої актуальності набувають дослідження, спрямовані на інтенсифікацію процесів спалювання вуглеводневих сумішей, зниження питомих витрат палива та мінімізацію викидів шкідливих речовин. Основним викликом сьогодення є необхідність придушення процесу утворення термічних оксидів азоту, що є прямим наслідком високих пікових температур у зоні горіння. Найбільш ефективним шляхом вирішення цієї проблеми є перехід до спалювання збіднених паливно-повітряних сумішей. Проте впровадження таких режимів супроводжується низкою критичних бар'єрів:

Кінетична нестабільність: Робота на межі займання призводить до різкого зниження швидкості ланцюгових реакцій, що провокує неповне згоряння вуглеводнів та викиди монооксиду вуглецю.

Низька реакційна здатність: Традиційні системи запалювання не здатні забезпечити стабільне ініціювання суміші за умов надлишку окисника.

Таким чином необхідність збіднення суміші задля екологічної безпеки вступає у конфлікт із фізичними обмеженнями стабільності горіння. Це зумовлює потребу у відмові від пасивних методів на користь активних електротехнологічних систем керування.

Одним із найбільш перспективних напрямів подолання зазначених вище бар'єрів є застосування електротехнологій.

Використання плазмових ефектів та електричних розрядів дозволяє інтенсифікувати утворення активних радикалів зокрема озону, що знижує кількість енергії для активації суміші. Це дає змогу підтримувати стійке горіння навіть у тих режимах, де традиційні методи виявляються неефективними. Крім того, наявність природної іонізації у факелі створює умови для ефективного зовнішнього впливу на гідродинаміку потоку через ефект «іонного вітру», що забезпечує додаткову турбулізацію та повноту згоряння палива.

1.2 Характеристика процесів горіння вуглеводневих сумішей

Вуглеводневі суміші, що знаходять широке застосування в енергетичних установках, промислових печах, котлах і двигунах внутрішнього згоряння, виділяються складною фізико-хімічною природою процесів горіння. Спалювання цих сумішей включає кілька ключових етапів: запалювання, розвиток полум'я, перенесення маси й тепла, а також хід хімічних реакцій окиснення. Швидкість і повнота останніх істотно залежать від складу палива, умов подачі окисника, температури, тиску та гідродинамічного режиму. Водночас традиційні підходи до організації горіння не завжди здатні забезпечити стабільність полум'я та оптимальну ефективність згоряння, особливо під час роботи з бідними або нестабільними сумішами. Це зумовлено головним чином кінетичними обмеженнями швидкості ланцюгових реакцій окиснення, а також труднощами у підтриманні паливно-повітряної суміші за наявності турбулентних потоків.

Аналіз стадії ініціювання процесу горіння набуває особливої значущості у контексті сучасних теплотехнічних систем. Зокрема, перехід до спалювання збіднених паливно-повітряних сумішей має потенціал зниження пікових температур у зоні горіння. Це, в свою чергу, є важливим чинником, що сприяє зменшенню інтенсивності механізмів утворення термічних оксидів азоту. Однак експлуатація в режимі спалювання збіднених сумішей супроводжується

певними викликами, такими як зрив полум'я, неповне згоряння вуглеводневих компонентів та поява термоакустичних автоколивань, які можуть значно вплинути на тривалість експлуатації та ефективність роботи обладнання. На додачу до цього, фізико-хімічні процеси, що відбуваються в зоні горіння вуглеводневого палива, супроводжуються явищем природної іонізації, яке характеризується формуванням заряджених частинок у фронті полум'я. Наявність власного об'ємного електричного заряду у полум'ї відкриває унікальні можливості для застосування зовнішніх електричних впливів як ефективного інструменту для прямого управління кінетичними та гідродинамічними процесами горіння з мінімальними енергетичними затратами.

1.3 Електротехнологічні методи впливу на горіння

У зв'язку з цим у наукових дослідженнях значна увага приділяється використанню електричних і електромагнітних впливів на процеси спалювання. До таких впливів належать електричне запалювання, плазмові та коронні розряди, електростатичні поля, а також застосування високочастотних і імпульсних електричних сигналів. Дані методи дозволяють впливати на кінетику хімічних реакцій, активізувати утворення радикалів, підвищувати швидкість займання та розширювати межі стабільного горіння вуглеводневих сумішей.

Аналіз літературних джерел свідчить, що застосування електротехнологій у процесах горіння сприяє покращенню запалювальних властивостей паливно-повітряних сумішей, зменшенню часу індукції займання та підвищенню стійкості полум'я. Особливо ефективним є використання електричних розрядів у випадках, коли спалювання відбувається за понижених температур або при надлишку повітря. Електричний вплив у таких умовах забезпечує додаткову енергію для ініціювання реакцій окиснення та формування активних центрів горіння.

Механізм такої інтенсифікації базується на переході від суто термічного ініціювання реакцій до розгалуженого ланцюгового механізму, де електричний

розряд генерує високоенергетичні електрони. Останні при зіткненні з молекулами палива та окисника стимулюють утворення активних радикалів та озону, що значно знижує енергію активації всієї суміші. Це дозволяє підтримувати стабільне горіння навіть за межами концентраційної межі займання, що є критично важливим для енергоустановок, які працюють у перехідних режимах.

Окрему групу досліджень становлять роботи, присвячені застосуванню ковзних, бар'єрних та іскрових розрядів для керування процесами спалювання газових і газорідних вуглеводневих сумішей. Показано, що електричні розряди здатні суттєво змінювати структуру полум'я, інтенсифікувати процеси масо- і теплопереносу, а також знижувати концентрації оксидів азоту та оксиду вуглецю у продуктах згоряння. Разом з тим ефективність таких методів значною мірою залежить від параметрів електричного поля, геометрії електродів та режимів подачі палива.

Незважаючи на значну кількість теоретичних і експериментальних досліджень, у науковій літературі відсутній єдиний підхід до кількісної оцінки впливу електротехнологій на процеси спалювання вуглеводневих сумішей. Більшість наявних робіт зосереджена на окремих аспектах процесу, тоді як комплексний аналіз взаємодії електричних впливів з гідродинамікою та хімією горіння залишається недостатньо розробленим. Крім того, обмеженими є дані щодо застосування електричних розрядів у експериментальних установках, наближених до реальних умов роботи промислових теплотехнічних систем.

1.4 Ефективність та переваги використання електротехнологій

Окремою важливою перевагою застосування електротехнологій є високий коефіцієнт енергетичного підсилення: енергія, що вкладається в електричний розряд, ініціює вивільнення значно більшої кількості хімічної енергії палива за рахунок стабілізації фронту полум'я. Це створює умови для реалізації концепції "інтелектуального пальника", здатного миттєво адаптуватися до змінних режимів навантаження. Окрім прямої економії палива, використання ковзних

розрядів забезпечує синергетичний екологічний ефект: запобігання утворенню термічних оксидів азоту при одночасному досягненні максимальної повноти згоряння, що є недосяжним для більшості сучасних пальників з пасивним змішуванням.

Таким чином, аналіз сучасного стану показує, що використання електротехнологій у процесах спалювання вуглеводневих сумішей є перспективним напрямом підвищення ефективності та екологічності теплотехнічних установок. Разом з тим наявні наукові напрацювання потребують подальшого розвитку, зокрема в частині експериментального дослідження електричних ковзних розрядів та їх впливу на характеристики горіння.

1.5 Аналіз існуючих статей і патентів

Сучасний стан розвитку технологій плазово-стимульованого горіння характеризується переходом від фундаментальних лабораторних досліджень до активного патентування промислових зразків. Аналіз патентної активності провідних технологічних компаній, таких як Acutronic Turbines та Eldor Corporation., свідчить про фокусування зусиль на створенні інтелектуальних систем запалювання для авіакосмічної галузі. Зокрема, патенти 2023–2025 років описують методи інтеграції ковзного розряду безпосередньо в сопла форсунок, що дозволяє проводити попередню фрагментацію молекул палива безпосередньо перед зоною реакції. Хоча ці патенти і досліджують використання ковзного розряду для покращення ефективних характеристик, проте спалювання в них відбувається під великим тиском і вузько спеціалізованій сфері що унеможлиблює використання в побутових умовах. Наше дослідження сфокусоване на використанні ковзного розряду в сільськогосподарській сфері яка є мало дослідженої в порівнянні з більш тонкими галузями.

В українському науковому сегменті ключові досягнення пов'язані з розробками Київського національного університету імені Тараса Шевченка та НТУ «ХПІ». Дослідження цих шкіл зосереджені на використанні обертального ковзного

розряду для реформінгу вуглеводнів при спалюванні альтернативних, зокрема вологомістких палив, що корелює з концепцією «екологічної безпеки».

В роботі Київського національного університету імені Тараса Шевченка представлено установку в якій велика площа взаємодії плазми з рідиною забезпечує ефективне використання системи для обробки рідини з метою її дезінфекції та руйнування забруднювачів. Що дозволяє зменшити кількість викидів за рахунок використання ковзного розряду, проте він не використовується тут для підпалу вуглеводневої суміші.

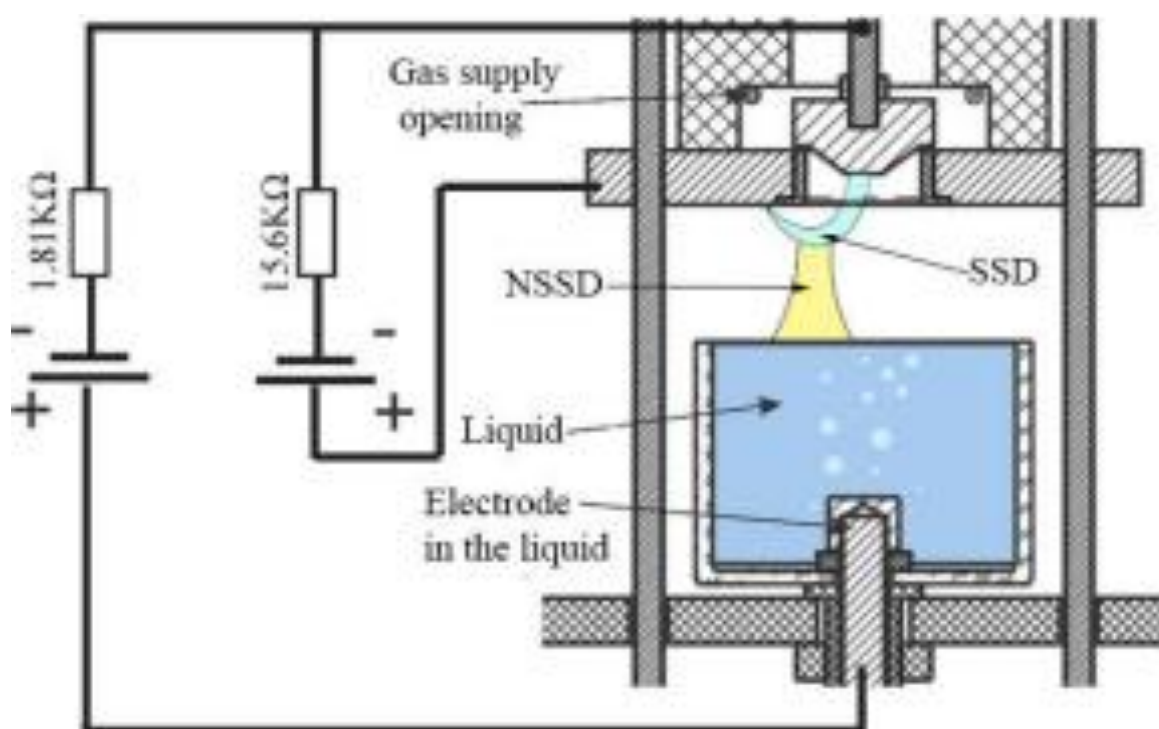


Fig. 1. The scheme of studied plasma-liquid system

Рис. 1.1. Схема досліджуваної плазово-рідинної системи використаної в дослідженні Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Проте ці дослідження сфокусовані більше на обробці рідини з метою її дезінфекції та руйнування забруднювачів ніж на спалюванні. В нашому дослідженні на противагу фокус зміщений на дослідження спалювання збідненої вуглеводневої суміші підсиленої ковзним розрядом.

Світові наукові тренди останніх років виділяють три магістральні напрями розвитку систем з ковзним розрядом: Кінетичне керування: Використання наносекундних імпульсних розрядів для генерації активних радикалів без

термічного нагріву газу, що дозволяє знизити викиди на рівень, недосяжний для традиційних пальників. Воднева адаптація: Застосування плазмових ефектів для стабілізації горіння сумішей з високим вмістом водню, де виникають ризики зворотного проскоку полум'я. Інтелектуалізація: Патентування алгоритмів динамічного керування частотою розряду в режимі реального часу залежно від складу суміші, що дозволяє реалізувати згадану раніше концепцію «інтелектуального пальника». Що загалом дозволяє зменшити кількість викидів і підвищити якість спалювання.

Незважаючи на десятиліття досліджень, у світі досі відсутній єдиний підхід до кількісної оцінки впливу плазми на горіння. Більшість робіт описують якісні ефекти, тоді як наше дослідження з експериментальною установкою спрямоване на отримання конкретних даних що дозволить висвітлити закономірності у використанні ковзного розряду при спалюванні.

Висновки

1. Електротехнологічні методи керування горінням забезпечують максимальну ефективність спалювання вуглеводневих сумішей у порівнянні з традиційними методами, особливо в режимах роботи на збіднених сумішах. Це дозволяє досягти стабілізації факела та повноти згоряння палива за умов, де звичайні системи ініціювання виявляються недієздатними.
2. Метою інтенсифікації процесу спалювання вуглеводневих сумішей є досягнення максимальної швидкості поширення фронту полум'я та мінімізації викидів токсичних компонентів за умови зниження витрат палива, скорочення часу індукції займання та забезпечення високої енергоефективності обладнання.
3. Для інтенсифікації процесу спалювання використовуються різноманітні електротехнологічні чинники, але найбільш перспективним є використання ковзного електричного розряду. Електричне поле та плазмові ефекти інтенсифікують процес генерації активних радикалів, іонний вітер руйнує ламінарний підшар і сприяє турбулізації потоку, покращуючи процеси масо- та

теплопереносу в зоні реакції, що збільшує швидкість горіння та розширює межі стійкості полум'я.

4. Використання електротехнологій, зокрема ковзного розряду, є найбільш перспективним методом подолання «кінетичної нестабільності» бідних паливно-повітряних сумішей. Це дозволяє вирішити конфлікт між необхідністю збіднення суміші задля екології та фізичними обмеженнями стабільності горіння.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ РОЗРЯДІВ

2.1 Класифікація розрядів у газах

Електричний розряд у газах — це явище проходження електричного струму через газ під впливом електричного поля. Властивості газових розрядів залежать від різних умов, зокрема тиску, типу газу, напруги, інтенсивності електричного поля та інших факторів впливу.

Газові розряди, що зберігаються після припинення дії зовнішнього іонізатора, називаються самостійними. Для створення самостійного газового розряду необхідно, щоб напруженість електричного поля між електродами досягла певного граничного значення. Існує чотири основних типи самостійних газових розрядів: тліючий, іскровий, дуговий та коронний.

Спрощено вольт-амперна характеристика газового розряду виглядає так:

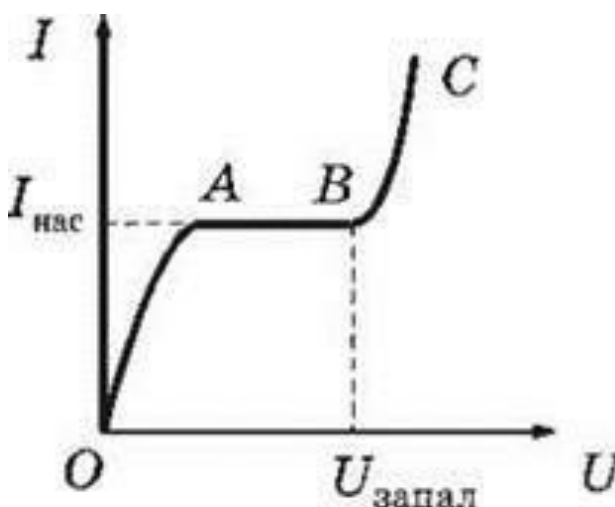


Рис. 2.1. вольт-амперна характеристика газового розряду

При $I = I_{\text{насичення}} (I_{\text{нас}})$ іони й електрони, які сповнюються під дією іонізатора, досягають електродів. Ділянка графіка OAB – несамостійний розряд, ділянка BC відповідає самостійному розряду в газах.

2.1.1 Тліючий розряд. Тип газового розряду з неоднорідним розподілом електричного поля між катодом і анодом— це самостійний розряд, при якому катод випускає електрони через опромінення позитивними іонами та високоенергетичними світловими квантами.

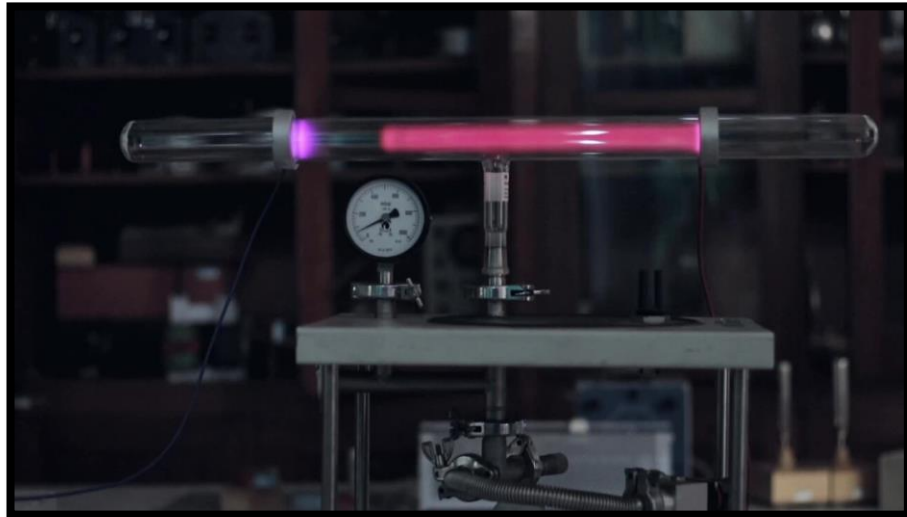


Рис 2.2 Тліючий розряд.

У тліючому розряді простір між катодом і анодом поділяється на області з різною яскравістю, в яких відбуваються специфічні фізичні процеси. Основний спад напруги при цьому розряді виникає поблизу катода і називається катодним падінням потенціалу. Зазвичай використовується в

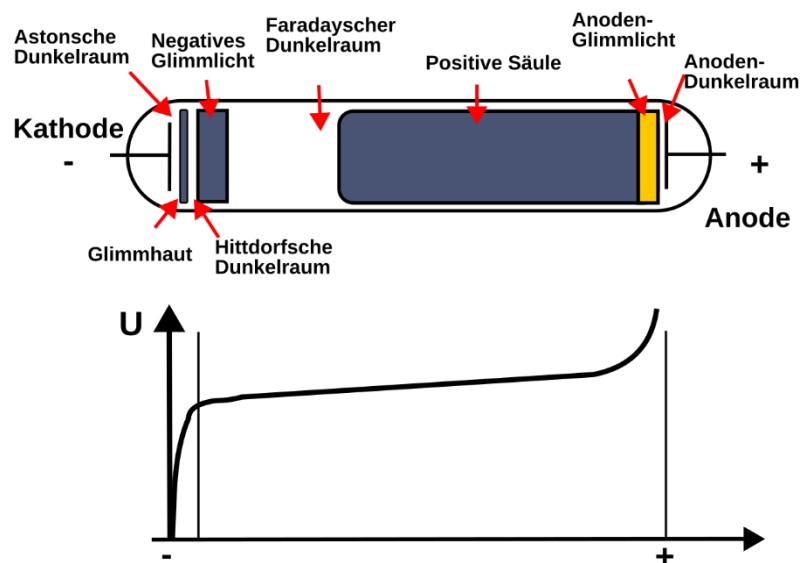


Рис 2.3 Области тліючого розряду і спади напруги в них різних пристроях що потребують випромінення світла таких як неонові лампи, підсвітки рідкокристалічних дисплеїв.

2.1.2 Іскровий розряд. Іскровий розряд м середовищі.



Рис 2.4 Іскровий розряд

Зазвичай він трапляється за атмосферного тиску й супроводжується характерним звуковим ефектом у вигляді тріску іскри. Іскровий розряд використовують в двигунах внутрішнього згоряння для підпалу горючої суміші.

Загалом іскровий розряд виникає, коли джерело енергії не спроможне забезпечити підтримання стаціонарного дугового або тліючого розряду. У таких умовах, разом із різким збільшенням розрядного струму, напруга на розрядному проміжку протягом дуже короткого часу (від кількох до сотень мікросекунд) падає нижче рівня, необхідного для підтримки іскрового розряду, що веде до його припинення. Після цього потенціальна різниця між електродами знову підвищується, досягаючи напруги запалення, і цикл повторюється. У випадках, коли джерело енергії має достатню потужність, можуть виникати явища, характерні для іскрового розряду, але вони зазвичай є лише перехідним етапом, який зрештою завершується формуванням розряду іншого типу, найчастіше дугового.

2.1.3 Дуговий розряд

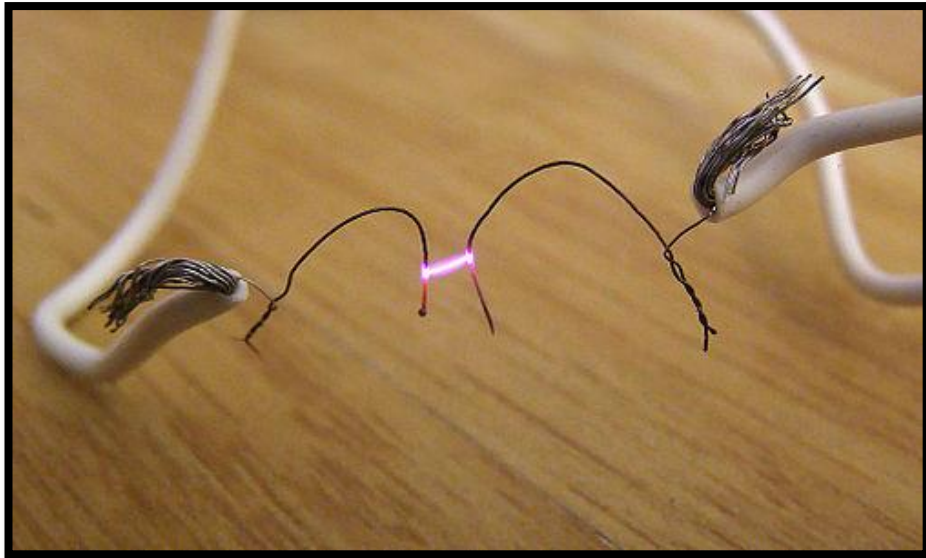


Рис 2.5 Дуговий розряд

Дуговий розряд це варіація самостійного газового розряду що виникає за високої температури і характеризується великою густиною струму хоч і низькою напругою. Зазвичай виникає при коротких замиканнях та розірванні вимикачів. Властивості цього розряду використовують при зварюванні різних матеріалів, також він застосовується в електропечах та дугових лампах.

2.1.4 Коронний розряд

Коронний розряд це вид газового розряду що виникає при високій напрузі але на відміну від дугового має низьку щільність струму. Коли напруженість електричного поля біля електроду досягає 30 кВ/см, починається коронний розряд, який супроводжується світінням навколо електроду.



Рис 2.6 Коронний розряд

Під час утворення вільні електрони, що завжди присутні в повітрі, прискорюються електричним полем. Якщо поле достатньо сильне, енергії електрона вистачає, щоб при зіткненні з молекулою газу вибити з неї новий електрон так утворюється ефект ударної іонізації. Коронний розряд широко використовується для очищення промислових газів від домішок. Пристрої, що виконують це називаються електрофільтрами. Їхній принцип роботи побудований наступним чином. Газ, що очищається, піднімається вгору через циліндр, у центрі якого розташований коронуючий дріт. У процесі цього молекули газу взаємодіють із іонами, які утворюються в зоні корони. Іони осідають на частинках домішок і притягують їх до зовнішнього некоронуючого електрода. У результаті домішки осідають, а газ стає очищеним що підвищує якість горіння.

2.2 Виникнення позитивної та негативної корони

Коли виникає негативна корона, відбувається складний електрофізичний процес, що включає участь позитивно заряджених іонів, які утворюються через генерацію електронних лавин. Ці іони, під дією сильного електричного поля в зоні поблизу катода, набирають значне прискорення. Під час зіткнень із поверхнею катода вони вибивають електрони, використовуючи механізм вторинної електронної емісії. Вивільнені електрони, в свою чергу, стають основою для формування нових лавин, створюючи своєрідний каскадний ефект.

Однак, розвиток лавин має свої обмеження. На певній дистанції від поверхні електрода інтенсивність електричного поля поступово слабшає до рівня, при якому електрони вже не здатні між зіткненнями накопичити достатню кількість енергії для викликання іонізації нейтральних молекул газу. Ця природна межа зупиняє подальше утворення лавин.

Позитивна корона виникає тоді, коли загострений електрод виконує роль анода. У такій ситуації електронні лавини формуються на межі корони й рухаються в

її напрямку. Іонізація нейтральних молекул на значній відстані від анода спричиняється поглинанням короткохвильового випромінювання, що випромінюється збудженим газом у зоні розряду. Позитивні іони, які утворюються під час іонізації, спрямовуються в бік катода.

2.3 Коронні розряди при атмосферному тиску

Коронні розряди часто виникають у природних умовах як наслідок впливу атмосферної електрики. Це явище, яке спостерігається як утворення корони на верхівках дерев, щоглах кораблів тощо, відоме під назвою вогнів святого Ельма. Подібні розряди також формуються навколо високовольтних ліній електропередачі. Іонізація повітря в зоні провідників, спричинена цими розрядами, призводить до втрат електроенергії.

Біля провідника з великою кривизною поверхні, наприклад, у зоні вістря, виникає високовольтний електричний розряд. У таких умовах спостерігається значний тиск, а електричне поле поблизу провідника характеризується неоднорідністю. Коли напруженість поля в районі вістря досягає значення 30 кВ/см, навколо провідника можна помітити свічення, яке набуває форми корони.

Напруженість електричного поля під час коронного розряду є досить високою, досягаючи приблизно 3×10^6 В/м, що спричиняє іонізацію навіть за атмосферного тиску. Зі збільшенням відстані від поверхні провідника напруженість поля швидко знижується. Через це процес іонізації та відповідне світіння газу спостерігаються лише в обмеженій області простору.

2.4 Фізичні аспекти коронних розрядів

Однією з ключових умов для появи коронного розряду є різка неоднорідність електричного поля. У зоні біля одного або обох електродів поле повинно бути значно сильнішим порівняно з іншими ділянками проміжку. Така ситуація зазвичай виникає, коли характерний розмір електрода r значно менший за міжелектродну відстань d . Як приклад, паралельні провідники з радіусом r починають проявляти коронування в повітрі лише за умови, коли виконується співвідношення $d/r > 5,84$. Якщо ця умова не дотримується, то при підвищенні напруги між провідниками виникає іскровий розряд

Розв'язання рівнянь електростатики для простих геометричних конфігурацій відіграє ключову роль у інтерпретації отриманих експериментальних даних.

У просторі між коаксіальними циліндрами з радіусами r тобто внутрішнім і R тобто зовнішнім, поле на відстані x від осі визначається так:

$$E = \frac{v}{x \ln(\frac{R}{r})} \quad (2.1)$$

В якому v означає напругу між циліндрами.

А між концентричними сферами радіусів r і R :

$$E = \frac{vrR}{x^2(R-r)}, \quad (2.5)$$

Також між сферою та віддаленою площиною це виглядає ось так. за умови $(R/r \rightarrow \infty)$:

$$E = \frac{vr}{x^2}, \quad (2.3)$$

Між вершиною параболоїдної форми із радіусом закруглення r та площиною, розташованою перпендикулярно на відстані d , значення поля на відстані x від вершини параболоїда вздовж його осі визначається наступним чином:

$$E = \frac{2v}{(r+2x)\ln(\frac{2d}{r}+1)}, \quad (2.4)$$

Якщо до паралельних провідників радіуса r , які знаходяться на відстані d один від одного, або до провідника та паралельної площини на відстані h , прикладена напруга V , то максимальні значення електричних полів у цих випадках дорівнюватимуть:

$$E_{max} = \frac{v}{2r} \ln\left(\frac{d}{r}\right), \quad (2.5)$$

$$E_{max} = \frac{v'}{r} \ln\left(\frac{2h}{r}\right), \quad (2.6)$$

Поля матимуть однакові значення, якщо у другому варіанті $v' = v\sqrt{2}$ і $h = d\sqrt{2}$.

Коли докладена напруга v менша за напругу запалювання корони v_k , в електричному колі можна спостерігати несамотійний струм, значення якого складає приблизно 100^{-15} А. Це явище викликане рухом іонів, які утворюються через вплив космічного випромінювання та природної радіоактивності. У лабораторних умовах запалювання корони проявляється не лише як слабе світіння біля електрода, що може залишитися непоміченим, але й у вигляді стрімкого збільшення струму до значень порядку 100^{-7} А.

Коронний розряд належить до окремих типів електричних розрядів, і його виникнення пов'язане з фізичним механізмом генерації електронів у зоні підвищеного електричного поля, де відбувається процес іонізації. Спосіб розмноження електронів значною мірою визначається полярністю коронуючого електрода.

За умови що електрод виконує функцію катода тобто негативної корони, процес множення електронів у зоні сильного електричного поля біля катода відбувається за рахунок утворення електронних лавин. Ці лавини ініціюються первинними електронами, які формуються внаслідок іонізації газу. До вторинних процесів належить емісія електронів із катода, а також можлива фотонна іонізація в газовому об'ємі. Механізм запалювання негативної корони загалом не відрізняється від Таунсендівського пробою. Основним критерієм для запалювання виступає рівняння.

$$\int_0^x [\alpha(x) - a(x)] dx = \ln(1 + y^{-1}) \quad (2.7)$$

α – іонізаційний коефіцієнт Таунсенда, y – ефективний коефіцієнт вторинної емісії. Область інтегрування в рівнянні простирається від поверхні катода до точки x , де $\alpha = a$ і зупиняє розмноження електронів.

У випадку відсутності прилипання область інтегрування технічно розширюється аж до анода. Проте через різке зменшення коефіцієнта $\alpha(E)$ із віддаленням від дроту чи вістря інтегрування проводиться до точки x , де поле суттєво слабшає і $\alpha[E(x)] \approx 0$.

І у зоні розмноження електрони також викликають збудження молекул.

Поза зоною корони в електрично негативному газі електронів майже немає і вони, подолавши невелику відстань, швидко перетворюються на негативні іони. У випадку електрично позитивного газу, поле залишається занадто слабким, а електрони рухаються надто повільно, тому газ за межами корони практично не випромінює світло. Якщо вістря або дріт виступають анодом тобто позитивною короною, віддалений великий катод, поблизу якого інтенсивність поля низька, не бере участі в процесі розмноження електронів. Формування нових електронів у зоні підвищеної напруженості поблизу анода

зумовлене здебільшого вторинними фотонними процесами, що відбуваються в газі.

У деяких випадках, особливо за певних конфігурацій електродів, таких як вістря в зоні позитивної корони можна спостерігати утворення локалізованих світних структур тобто стримерів. Проте в симетричних системах із двома електродами у вигляді струн такі стримери зазвичай не з'являються, що вказує на залежність цього ефекту від геометрії електродів.

Як критерій для визначення моменту запалювання позитивної корони можна використовувати умову формування стримера, адаптовану до випадку неоднорідного електричного поля:

$$\int_0^x [\alpha - a] dx \approx 18 - 20 \quad (2.8)$$

Попри ймовірну різницю у коефіцієнтах підсилення в 2 або навіть 3 рази, у значеннях інтегралів (2.7) і (2.8), величина критичного поля поблизу електрода залишається майже незмінною.

Експерименти демонструють, що в багатьох випадках, зокрема в повітряному середовищі, різниця між напругами запалювання позитивної та негативної корони є незначною.

При утворенні коронного розряду носії струму виникають лише в безпосередньому оточенні коронуючого електрода, де присутнє потужне електричне поле. У зовнішній зоні перенесення струму відбувається завдяки зарядам, які витягуються слабким полем, що наявне в цій області. У разі позитивної корони джерелом струму є позитивні іони, а при негативній короні це можуть бути негативні іони або електрони, зокрема якщо газ містить електронегативні домішки. Важливо зазначити, що струм у зовнішній зоні коронного розряду є несамостійним, оскільки іонізація газу в цьому регіоні відсутня.

Коронаційний струм є функцією прикладеної електричної напруги, зокрема її перевищення над пороговим потенціалом запалювання v_k .

Основним чинником, що обмежує струм у системі, є просторовий заряд носіїв електричного струму в зоні поза коронуючим електродом. У зоні самостійного розряду, яка формується безпосередньо поблизу коронуючого електрода, спостерігається здатність до генерації значних величин струму та великої кількості носіїв заряду.

Проте частина цих носіїв під час руху до протилежного електрода повертається у вихідну область під впливом дії просторового заряду, який має той самий знак. Ця фізична картина є аналогічною до явища обмеження струму просторовим зарядом у вакуумному діоді. Водночас у випадку коронного розряду заряди не рухаються вільно, а здійснюють дрейфовий рух під дією прикладеного поля. Викладені вище міркування дозволяють з певним ступенем наближення визначити вольт-амперну характеристику (ВАХ) стаціонарного коронного розряду.

Розглянувши проміжок між коаксіальними циліндрами. Струм на кожен одиницю довжини циліндра через поверхню довільного радіуса за вузькою зоною розмноження буде дорівнювати:

$$I = 2\pi x n \mu E = \text{const} \quad (2.9)$$

де n буде значити – щільність носіїв а μ – їх рухливість.

Якщо припустити, що струм, щільність зарядів та викривлення зовнішнього поля просторовим зарядом не надто великі. Тоді для розподілу $E(x)$ у першому наближенні зберігається закономірність (2.1), що дорівнює відсутності струму, але фактичній напрузі v . У цьому наближенні:

$$n = \frac{I}{2\pi e \mu E x} = \text{const} \quad (2.10)$$

Підставляючи формулу (2.10) в рівняння Пуассона та інтегруючи його, знайдемо розподіл поля у наступному наближенні. Сталу інтегрування виберемо так, щоб у границі $I \rightarrow 0$ добуток $x E$ виражався формулою (2.1) через потенціал запалювання v_k :

$$E = \frac{2l \ln(\frac{R}{r})}{\mu v} * \frac{x^2 - r^2}{2x} + \frac{v_k \ln(\frac{R}{r})}{x}, \int_r^R E dx = v \quad (2.11)$$

Інтегруючи E по x з урахуванням того, що в основній частині проміжку $x^2 \gg r^2$, і розв'язуючи отримане рівняння відносно I , знайдемо ВАХ корони:

$$I = \frac{2\mu v(v - v_k)}{R^2 \ln(\frac{R}{r})} \quad (2.12)$$

Закономірність, викладена у формулі (2.12), підтверджується результатами експериментів. Для її перевірки будується графік залежності зворотного опору I/v від напруги v , що дозволяє спостерігати його лінійну поведінку. Екстраполяція отриманої прямої до точки $I/v = 0$ дає можливість визначити потенціал запалювання v_k більш просто та точно, ніж це можна зробити за допомогою визначення порогу появи коронного розряду. З огляду на те, що рухливість позитивних і негативних іонів у газі є приблизно однаковою, струми позитивної та негативної корон при однаковій напрузі в електронегативному середовищі також виявляються близькими за значенням. Однак, за відсутності процесу прилипання, струм негативної корони, яку переносить електронний заряд, є суттєво більшим. Додавання електронегативної домішки одразу зменшує цей струм.

2.5 Ковзні розряди

Ковзні розряди являють собою особливий вид електричного розряду, який виникає на межі між твердим або рідким діелектриком і газоподібним середовищем у сильно неоднорідному електричному полі. Це явище найбільш характерне для високовольтних технічних конструкцій, де силові лінії електричного поля мають суттєву складову, направлену паралельно поверхні ізоляційного матеріалу. Важливою особливістю ковзних розрядів є їх виникнення при напругах, що значно нижчі за пробивну напругу чистого

повітряного проміжку аналогічної довжини, що підкреслює їх специфічну природу й роль у процесах електричної ізоляції.

За відносно низької напруги біля електродів утворюється корона, яка охоплює певну площу поверхні діелектрика, включаючи зону навколо коронуючого електрода. У процесі збільшення напруги з'являються невиразно провідні світлові канали, також відомі як стримери, які поступово трансформуються в ковзні розряди при подальшому зростанні напруги. Ковзні розряди характеризуються значно вищою провідністю та суттєво яскравішим світінням, що свідчить про утворення на поверхні діелектрика так званого плазмового електрода. Цей плазмовий електрод розширює поверхню, раніше притаманну лише області коронуючого електрода. Під час ковзних розрядів проходить суттєвий струм, який виникає внаслідок іонізації повітря. Інтенсивність цього струму тісно залежить від загальної площі усього плазмового електрода. Відповідно до концепції Теплера, ковзний розряд представляє собою частковий поверхневий розряд, який утворюється в результаті прикладення певної напруги.

$$U_k = \frac{1.35 \cdot 10^{-4}}{C_{\Pi}^{0.45}} \quad (2.13)$$

А поверхнева ємність знаходиться як характеристика, що відображає ємність одного квадратного сантиметра поверхні, на якій здійснюється розряд стосовно протилежного електрода. Одиниця вимірювання цієї величини представлена як фарад на квадратний сантиметр. Ф/см².

За невеликої товщини діелектричного матеріалу поверхнева ємність плоского конденсатора розраховується за формулою:

$$C_{\Pi} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\Delta} \quad (2.14)$$

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

Розрахунок формули є достатньо точним для $C_{\Pi} \geq 0,25 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/см}^2$

Також зниження напруги в умовах ковзного розряду залишається мінімальним, що сприяє ефективному перенесенню високого електричного потенціалу вглиб проміжку. Це, своєю чергою, полегшує розвиток розрядного процесу, оскільки із зростанням напруженості у проміжку з неперекритою ділянкою та суттєвим підвищенням температури в каналах відбувається збільшення довжини ковзного розрядного каналу. В завершенні процес досягає кінця через повне перекриття діелектричної поверхні конструкції. Довжина каналу ковзного розряду $I_{\text{ковз}}$ може бути визначена як функція напруги U та поверхневої ємності за допомогою формули Теплера.

$$I_{\text{ковз}} = k C_{\Pi}^2 * U^5 * \sqrt[4]{\frac{dU}{dt}} \quad (2.15)$$

де k – коефіцієнт визначений дослідним шляхом; U – діюча на момент напруга, $\frac{dU}{dt}$ - швидкість зростання напруги $u(t)$.

А якщо у формулі (2.15) замінити величину $I_{\text{ковз}}$ на проміжок L між електродами та припустити, що напруга $u(t)$ описується синусоїдальною залежністю від часу, тоді значення напруги, яка перекриває проміжок, відповідатиме наступному виразу U_p :

$$U_p = X L^{0,2} \left(\frac{\Delta}{\varepsilon}\right)^{0,4} \quad (2.16)$$

де $x = \text{const}$

Загалом напругу розряду через поверхню наближено можна визначити за цією формулою.

$$U_p = k \left(\frac{\Delta}{\varepsilon}\right)^m * L^n \quad (2.17)$$

де L — буде відстанню між двома електродами, см; Δ - товщиною діелектричного матеріалу, см; ε - відносною діелектричною проникністю діелектрика; k, m, n — це коефіцієнти, що прямо пропорційно залежать від особливостей конструкційного виконання ізоляційного проміжку та діапазону можливої зміни відстані між електродами по поверхні. Зволоження та-або забруднення поверхні діелектричного матеріалу будуть суттєво зменшувати розрядну напругу.

Висновки до розділу

1. Охарактеризовано основні типи самостійних газових розрядів: ліючий, іскровий, дуговий, коронний.
2. Встановлено, що спосіб розмноження електронів та закономірності розвитку розряду суттєво залежать від полярності електрода (позитивна чи негативна корона).
3. Встановлено закономірності виникнення розрядів за атмосферного тиску та їх формування навколо високовольтних ліній електропередач.
4. Аналіз електростатичних умов виникнення самостійного газового розряду показує, що фундаментальним критерієм формування корони є наявність різкої геометричної неоднорідності електричного поля. Цей стан досягається у випадках, коли характерний радіус кривизни електрода r є суттєво меншим за міжелектродну відстань d . Оцінка граничних співвідношень геометричних параметрів (дозволяє чітко розмежувати зони стабільного існування коронного розряду та області критичного перенапруження, що призводять до іскрового пробоя проміжку.
5. Ковзні розряди являють собою особливий вид електричного розряду, який виникає на межі між твердим або рідким діелектриком і газоподібним середовищем у сильно неоднорідному електричному полі. Це явище найбільш характерне для високовольтних технічних конструкцій, де силові лінії електричного поля мають суттєву складову, направлену паралельно поверхні ізоляційного матеріалу.

6. Розуміння інтегрального критерію Таунсенда, коефіцієнтів іонізації та емісії, а також формул формування стримерів дає змогу правильно закладати фізичні рівняння в комп'ютерні моделі. Це дозволяє прогнозувати поведінку системи та наприклад, форму затухаючої синусоїди імпульсу напруги ще до створення фізичного стенду.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА СТЕНДУ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЕЛЕКТРОПРИВОДА ВЕНТИЛЯТОРА

3.1 Розроблення експериментальної установки

Для реалізації поставлених завдань щодо інтенсифікації спалювання вуглеводневих сумішей та встановлення впливу плазмохімічних ефектів на показники горіння було розроблено та змонтовано експериментальний стенд. Функціональна схема розробленої установки наведена на рис. 3.1.1

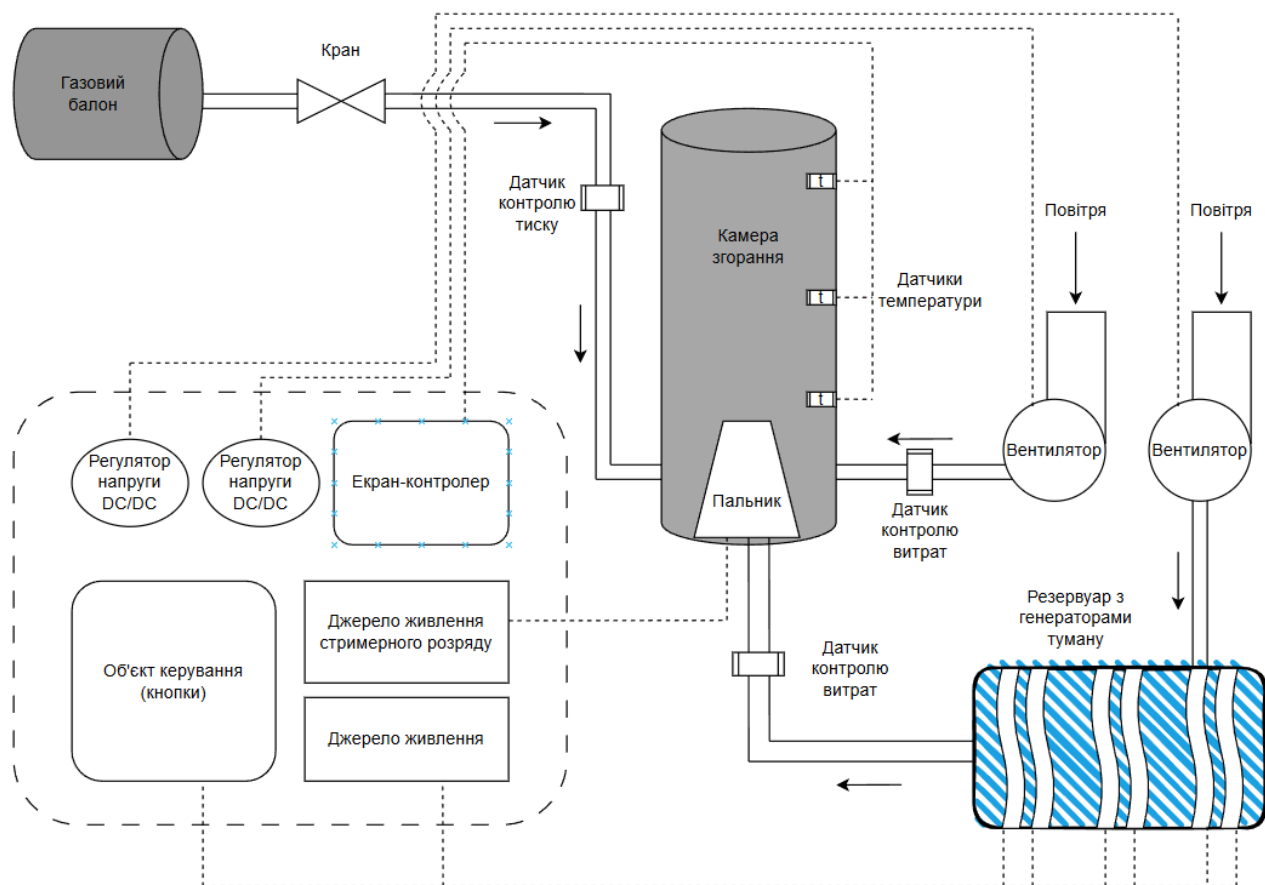


Рис. 3.1. Схема установки.

Функціонально експериментальна установка складається з ряду взаємопов'язаних систем, що забезпечують формування робочих потоків, генерацію плазмового розряду.

Складові частини та технічне забезпечення стенда:

Система підготовки та подачі газоповітряної суміші включає джерело вуглеводневого палива (балон), витратомірну та регулювальну арматуру. Контроль стабільності тиску в магістралі здійснюється за допомогою відповідного датчика. Нагнітання повітряного потоку (окислювача) реалізовано за допомогою відцентрових вентиляторів, що дозволяє варіювати коефіцієнт надлишку повітря, та вихровий рух газового потоку також забезпечується за допомогою системи введення газу в нижній частині анода. Де газ надходить через калібровані отвори, розташовані під кутом близько 20° до осі камери, що сприяє утворенню стабільного вихору.

Резервуар з ультразвуковими генераторами туману інтегрований у систему подачі повітря, що забезпечує введення дрібнодисперсної вологи в зону реакції для дослідження її впливу на стабільність ковзного розряду та екологічні показники горіння.

У камері згорання встановлено плазмотрон коаксіальної конструкції, оснащений центральним конічним катодом і зовнішнім циліндричним анодом що зображений на рисунку 3.1.2

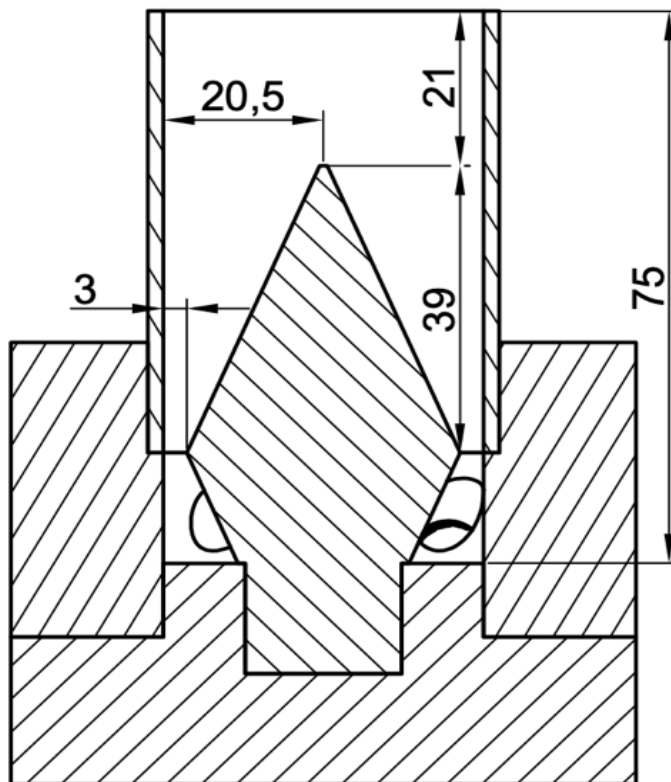


Рис 3.2. Ескіз плазмотрону з розрядним проміжком.

Він виготовлений з корозійностійкої сталі марки AISI 305. Компоненти мають коаксіальну конфігурацію з динамічно змінним геометричним зазором. Центральний електрод, що виконує функцію катода, має загальну довжину 98 мм. Його активна частина довжиною 52 мм виконана у формі конуса, діаметр якого поступово звужується від 35 мм у базі до 1 мм на вершині. Анод представлений трубчастою конструкцією з внутрішнім діаметром близько 40 мм. Завдяки такій геометрії міжелектродний зазор змінюється: від 3 мм у початковій точці до 20 мм на виході з системи. Мінімальний зазор в області основи конуса сприяє локальному збільшенню напруженості електричного поля, що є критично важливим для забезпечення первинного пробоя газу. У процесі роботи дуговий канал, сформований після пробоя, під впливом аеродинамічних факторів та електродинамічних сил Лоренца поступово зміщується по робочій зоні довжиною 54 мм. При цьому канал безперервно подовжується, рухаючись вгору.

Живлення плазмового модуля здійснюється від джерела високовольтного стримерного розряду NP 12000/30. Для регулювання потужності допоміжних вузлів а саме вентиляторів використано DC/DC регулятори.

При подачі високої напруги на електроди пальника в міжелектродному просторі виникає електричний пробій. Потік газоповітряної суміші, що виходить із сопла, переміщує опорні точки дуги вздовж розбіжних електродів, внаслідок чого формується ковзний розряд.

Завдяки утворенню низькотемпературної плазми в зоні реакції відбувається генерація активних радикалів, що знижують енергію активації окиснення вуглеводнів. Це дозволяє досягти стабільного горіння навіть при значному збідненні суміші.

Для отримання достовірних експериментальних даних установка обладнана комплектом датчиків, таких як інтегральний сенсор диференційного тиску серії MPX5014DP підключених до мікропроцесорного контролера ATmega328P на базі ардуіно з виводом даних на дисплей, Алгоритм програмного забезпечення, реалізований у цьому випадку, виконує функцію цифрової фільтрації сигналу

та здійснює перетворення значень динамічного тиску в параметри об'ємної та масової витрати. Ці операції виконуються в режимі реального часу, забезпечуючи високу точність і оперативність аналізу даних.

моніторинг температури в різних зонах факела здійснюється за допомогою датчиків температури. А контролює їх універсальний контролер температури зображених на рисунку 3.3

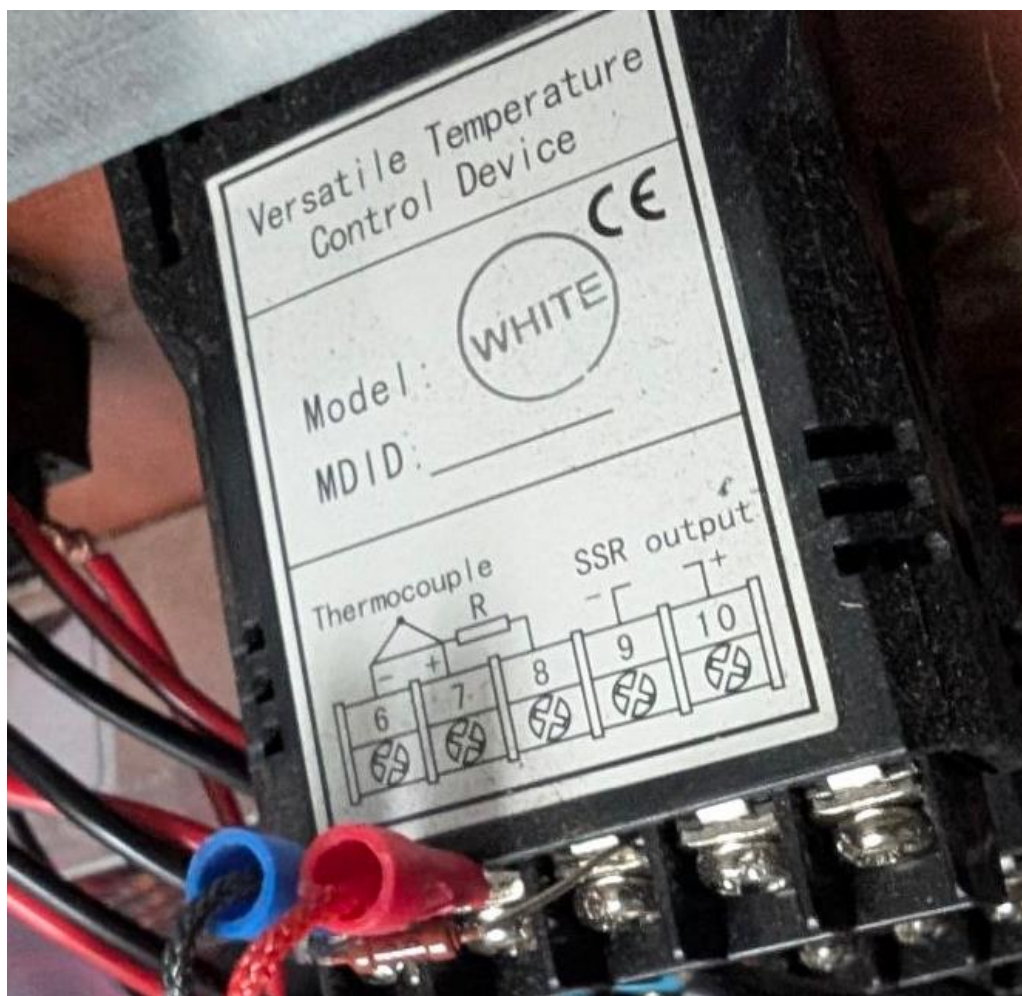


Рис 3.3. контролер температури

вимірювання об'ємних витрат палива та повітря проводиться датчиками контролю витрат для точного розрахунку енергетичного балансу установки. Така конфігурація стенда дозволяє проводити комплексні дослідження електрофізичних характеристик ковзного розряду.

Електрична схема установки зображена на рисунку 3.4 :

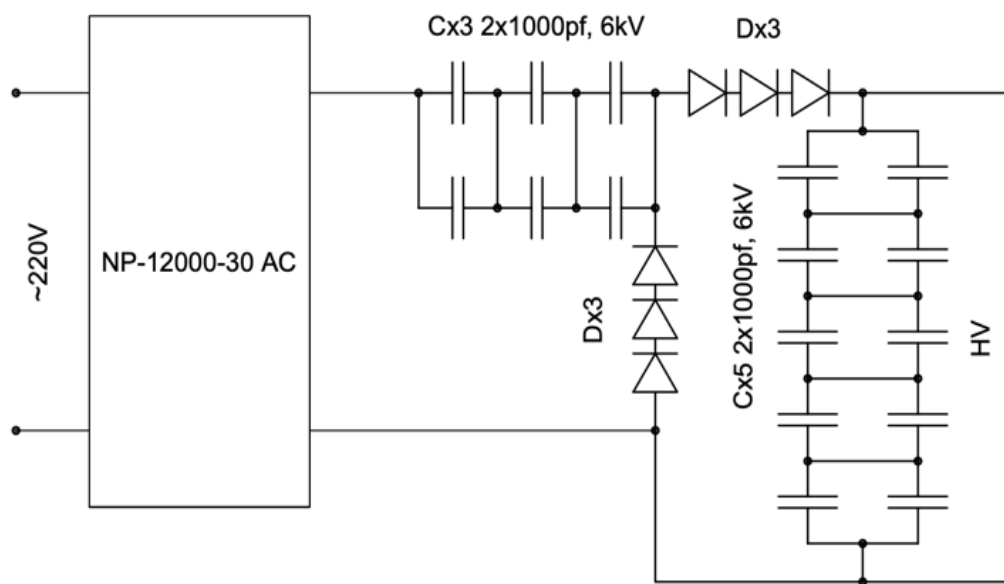


Рис. 3.4. Електрична схема експериментальної установки.

На ній зображено високовольтне джерело та каскадний помножувач напруги що допомагає додатково підняти напругу.

3.2 Трансформатор електронний Neonpro 12000/30

Електронний трансформатор Neonpro 12000/30 призначений для надійного живлення неонові реклами та декоративних світлових конструкцій. Пристрій забезпечує стабільний вихідний струм 30 mA та високу ефективність роботи що також підходить для створення стримерів які потім утворюватимуть ковзний розряд. Підвідні провідники, що з'єднують джерело живлення з електродами, виконані з використанням високовольтного кабелю довжиною не більше 30 см. Таке конструктивне рішення спрямоване на зменшення додаткової індуктивності.

Технічна характеристика Neonpro 12000/30

№ з/п	Характеристика	Значення
1	Напруга живлення, В	220-240±10%, 50-60 Гц
2	Вихідна напруга, В	12 KV
3	Клас вологостійкості	IP65
4	Вихідний струм, А	30мА
5	Стійкість до температури	До-35
6	Габаритні розміри, мм	142x97x48
7	Габарити кріплення, мм	157x97
8	Маса, кг	1,5
9	Матеріал	Пластик



Рис 3.2 Трансформатор електронний Neonpro 12000/30

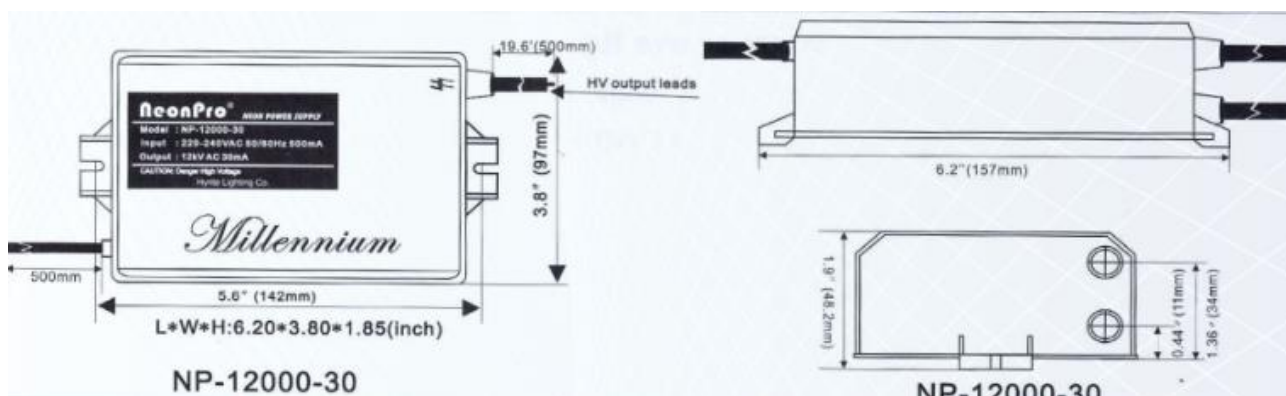


Рис 3.3 Габаритна схема трансформатор електронний Neonpro 12000/30

3.3 Розробка електропривода вентилятора

Для потенційного масштабування і впровадження технології використання ковзного розряду в системах спалювання збіднених вуглеводневих сумішей було проведено інженерний розрахунок, моделювання та підбір двигуна в частотно-регульованому електроприводі вентиляторної установки, здатної забезпечити необхідну продуктивність та тиск для подолання аеродинамічного опору тракту камери згоряння при різних режимах з урахуванням можливостей промислового масштабування, для ефективного застосування електричного ковзного розряду.

В електроприводі буде використовуватись електродвигун 6АМУ160М8 з широтно-імпульсним перетворювачем.

Потужність, кВт(для серійних номінальна)	11	Число пазів статора	48
Фазна напруга, В(для серійних номінальна)	380	Число пазів ротора	44
Ковзання, в.о.(для серійних номінальне)	0.025	Число витків обмотки статора	120
Число пар полюсів	4	Площа перерізу ефективного провідника обмотки статора, мм ²	1.764
Частота живлячої напруги, Гц (для серійних номінальна)	50	Число паралельних гілок обмотки статора	2
Ступень захисту IP	44	Відносне скорочення шагу обмотки статора	1
Клас ізоляції	F (155°C)	Висота (діаметр) ізольованого провідника статора, мм	1.14
Матеріал станины	Сталь	Число елементарних провідників в одному ефективному	2
Висота вісі обертання	160	Схема з'єднання обмотки статора	зірка

Рис 3.4 Характеристики електродвигуна

3.3.1 Габаритні характеристики двигуна 6АМУ160М8. Більшість загальнопромислових електродвигунів випускаються за стандартами ДСТУ та «Інтерелектро» із фіксованою прив'язкою потужності до габаритів.

Таблиця 3.2

Габаритна характеристика 6АМУ160М8

Електродвигун	IP	Розміри, мм	Вал, мм		Лапи, мм		Фланець, мм		Вага, кг
			d1	l1	l10	b10	d20	d22	
6АМУ160М8	IP54, IP 55	680x430x358	48	110	210	254	350	19	124

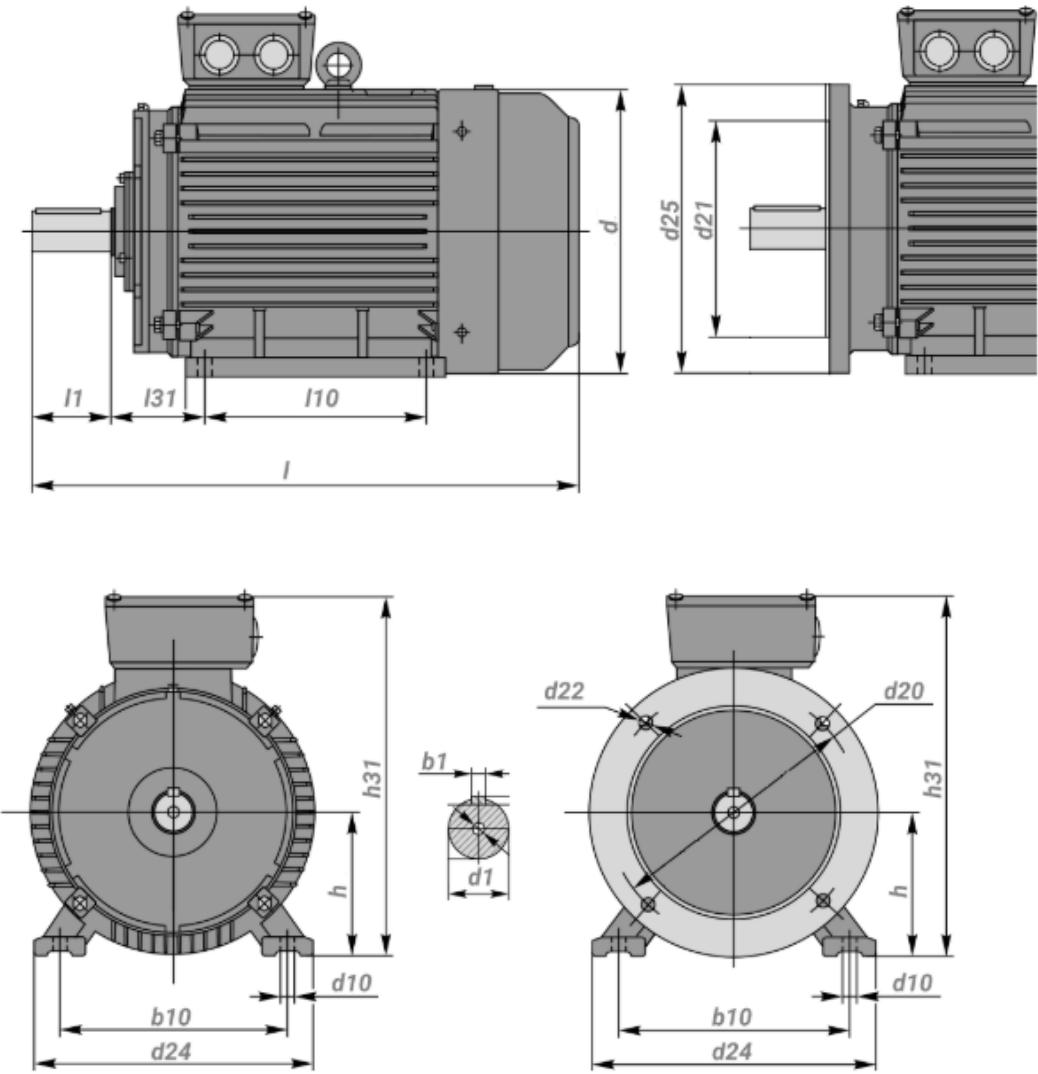


Рис 3.5 Схема габаритних характеристик двигуна

3.3.2 Широтно-імпульсного перетворювача. Задля покращення ефективності електроприводу використовуємо широтно-імпульсний перетворювач для регулювання характеристик пристрою.

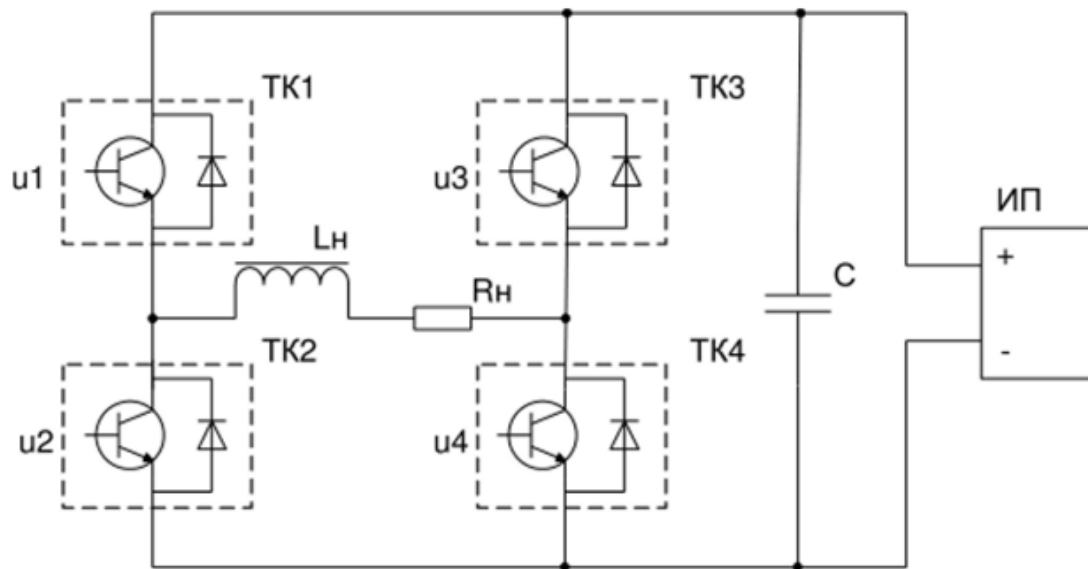


Рис 3.6 Функціональна схема широтно-імпульсного перетворювача

Перетворювач буд підібраний під наявний електродвигун і відповідає необхідним вимогам що до характеристик.

Номинальная мощность, кВт	11	Частота коммутации, кГц	12
Макс. вых. напряжение, В	330	Скорость изменения частоты, Гц/с	100
Ном. выходная частота, Гц	50		
Диапазон изменения частот		Закон управления	
с 5	до 100	☐ $U/f = \text{const}$ ☐ $\Phi = \text{const}$ ☐ $U/\sqrt{f} = \text{const}$ ☒ $E_r/f = \text{const}$ ☐ $U/f^2 = \text{const}$ ☐ $I_s/f_r = \text{const}$ ☐ $U = \text{const}, f = \text{var}$ ☐ $I_s/\sqrt{f_r} = \text{const}$ ☐ $E_s/f = \text{const}$ ☐ $I_s/f_r^2 = \text{const}$ ☐ 1 ☐ 2 ☐ $I = \text{const}, f = \text{var}$ ☐ 3 ☐ 4	
ККД	0,9	Бустерная напряжение, В	
Коеф-т схемы выпрямителя	1	0	
Коеф-т схемы инвертора	1		
Коеф-т звена пост. тока	1		
Вид обратного звязку		Вартість, у.о.	
☒ Разімкнена ☐ ОЗ з швидкості		300	
Число графиков		Вага, кг	
20		12	
Коефіцієнт зміни частоти		Висота, мм	
		130	
		Ширина, мм	
		320	
		Глубина, мм	
		250	

Рис 3.7 Характеристики широтно-імпульсного перетворювача

3.3.3 Комп'ютерне моделювання електропривода. Комп'ютерне моделювання електропривода — це сучасний метод дослідження електромеханічних систем за допомогою програмного забезпечення, що дозволяє вивчати динамічні процеси, енергоефективність та системи керування без проведення дорогих натурних експериментів

Використовуючи наявний електродвигун та перетворювач було проведено моделювання навантаження для вентиляторної установки з метою дослідження впливу перехідних процесів на роботу електродвигуна під вентиляторним навантаженням та отримання механічної характеристики.

Результатом моделювання є тахограма на якій чітко видно зміну режиму установки на рис 3.8

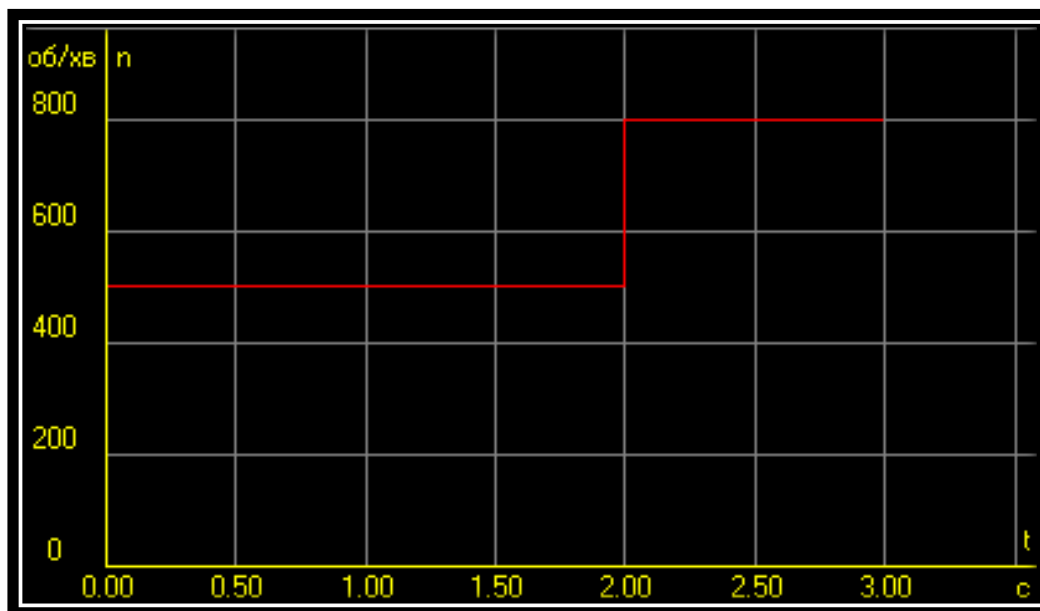


Рис 3.8 Тахограма при змінах режиму

Також отримано механічну характеристику електродвигуна установки рис 3.7

На якій видно залежність статичного моменту опору навантаження на валу машини від її кутової швидкості. Тобто вона показує, як змінюється необхідний момент для підтримання роботи машини при різних швидкостях.

Плавний набір моменту відносно обертів на хвилину показує правильно підібраний режим.

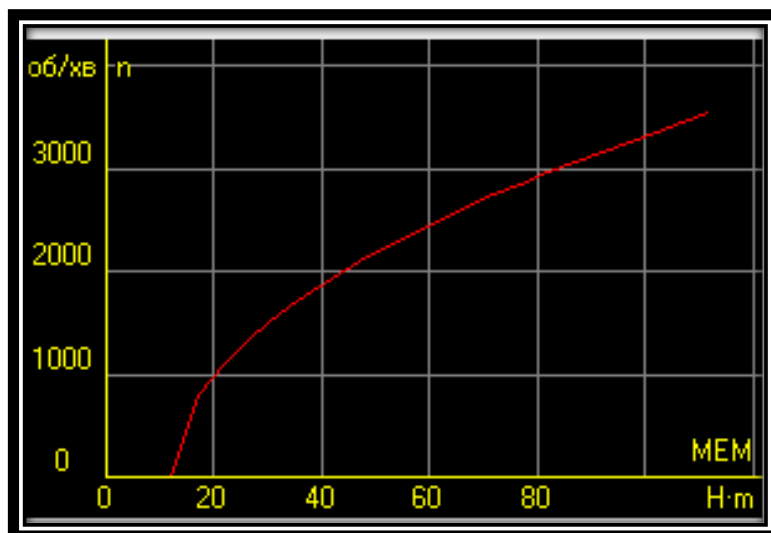


Рис 3.9 Механічна характеристика

Важливо також враховувати встановлення залежностей та коефіцієнтів, що характеризують зміну потужності під час перехідного процесу вентиляторної установки. Для цього потрібно змодельовати схему потужності від часу для розуміння балансування споживаної потужності при змінах режиму. Що продемонстровано на рис 3.10.

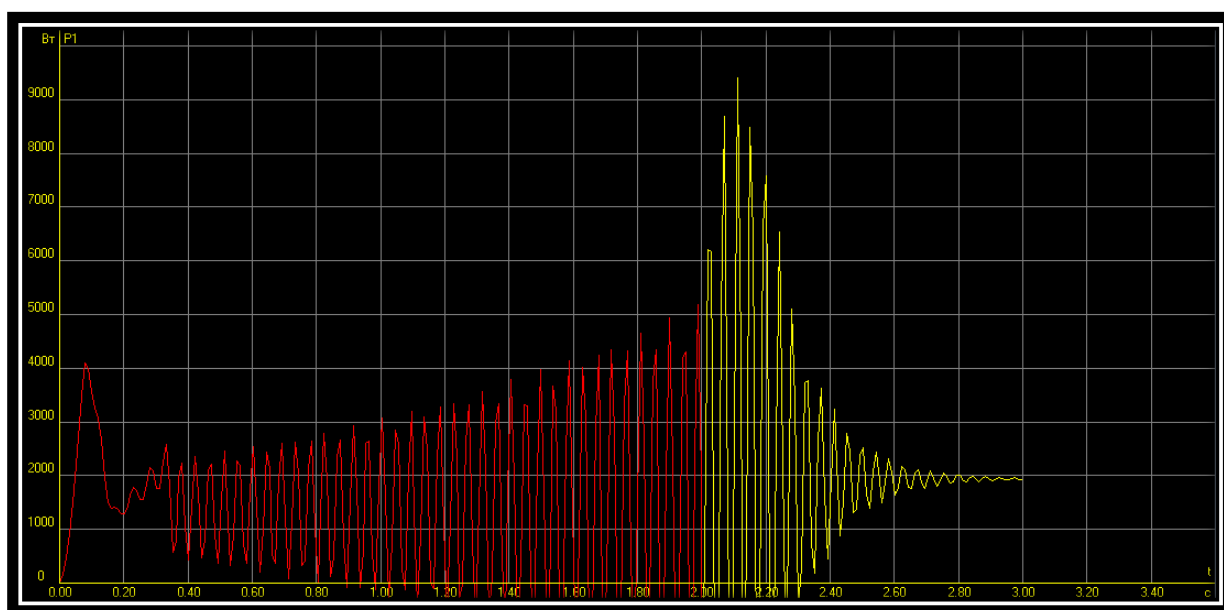


Рис 3.10 перехідний процес щодо споживаної потужності при змінах режиму

Висновки до розділу

1. Для реалізації поставлених завдань щодо інтенсифікації спалювання вуглеводневих сумішей та встановлення впливу плазмохімічних ефектів на показники горіння було розроблено та змонтовано експериментальний стенд.
2. Встановлено, що конструктивне рішення подачі газу під кутом близько 20° до осі камери сприяє утворенню стабільного вихрового потоку. Цей потік, у взаємодії з електродинамічними силами Лоренца, забезпечує ефективне переміщення опорних точок дуги та безперервне подовження каналу, формуючи стабільний ковзний розряд.
3. Електронний трансформатор Neonpro 12000/30 призначений для надійного живлення неоновієї реклами та декоративних світлових конструкцій загалом підходить також для створення стримерних розрядів в середині камери згорання експериментального стенду.
4. Для потенційного майбутнього масштабування і впровадження технології використання ковзного розряду в системах спалювання збіднених вуглеводневих сумішей було проведено інженерний розрахунок, моделювання та підбір двигуна в частотно-регульованому електроприводі вентиляторної установки.
5. Комп'ютерне моделювання електроприводів є прогресивним методом дослідження електромеханічних систем, який використовує спеціалізоване програмне забезпечення. Завдяки цьому підходу можна аналізувати динамічні процеси, оцінювати енергоефективність та оптимізувати системи керування, уникаючи витратних експериментів у реальних умовах.
6. Результати комп'ютерного моделювання електропривода на базі двигуна 6AMU160M8 із широтно-імпульсним перетворювачем підтвердили правильність підбору обладнання. Отримані механічні характеристики та тахограми демонструють плавний набір моменту відносно обертів, що свідчить про стабільність системи під час перехідних процесів та зміни режимів навантаження.
7. Обґрунтовано та реалізовано специфічну коаксіальну конфігурацію плазмотрона з динамічно змінним міжелектродним зазором, що збільшується

від 3 мм на вході до 20 мм на виході. Звуження конічного катода забезпечує локальне збільшення напруженості електричного поля, що є критично важливим для гарантованого первинного пробою газу

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПОРІВНЯННЯ З МАТЕМАТИЧНОЮ МОДЕЛЛЮ

4.1 Теоретична частина результатів експериментальних досліджень

Отримання результатів виконувалося за допомогою осцилографа OVON XDS3105E який використовував пасивний щуп серії P6100. Отримані осцилограми мали ціну поділки 250 mks/поділку по горизонталі та 250 mv/поділку по вертикалі. Проте враховуючи коефіцієнт дільника та щупа справжня ціна поділки ближче до 2,8 kv/поділку.

Для визначення напруги між електродами використовувалась формула:

$$U_p = U_o * K \quad (4.1)$$

де $K \approx 1,44 * 10^4$.

Незважаючи на теоретичну можливість вимірювання до 1 Ghz, для фіксації низькочастотних процесів використовувалася дискретизація апарату на частоті 2 Mhz, чого більш ніж достатньо для коректного FFT аналізу спектру до 1 Mhz.

Для визначення коефіцієнта згасання α використовували логарифмічний декримент.

$$\alpha = \frac{1}{T_d} \ln\left(\frac{U_1}{U_2}\right) \quad (4.2)$$

Де $U_{1,2}$ це амплітуди послідовних піків, а T_d відповідає за період коливань.

Задля аналізу отриманих даних з осцилографа та визначення точних параметрів плазми було застосовано стандартну модель RLC контуру.

Ємність та індуктивність розрядного проміжку були визначені на основі аналітичних залежностей, характерних для коаксіального кабелю.

Тобто

$$L = \frac{u_0 * L}{2\pi} * \ln\left(\frac{R}{r}\right) \quad (4.3)$$

А індуктивність буде визначатись як

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)} \quad (4.4)$$

В даних формулах R та r відповідають за внутрішній і зовнішній радіуси робочого зазору, а L за відстань катодної секції.

Після обчислень робочої зони плазмотрона в середньому значення індуктивності склали близько 11,5 нГн а ємності близько 2,7 пФ.

4.2 Аналіз результатів експериментальних досліджень

Після проведення експерименту було отримано осцилограму при спалюванні вуглеводневої суміші зображену на рисунку 4.1

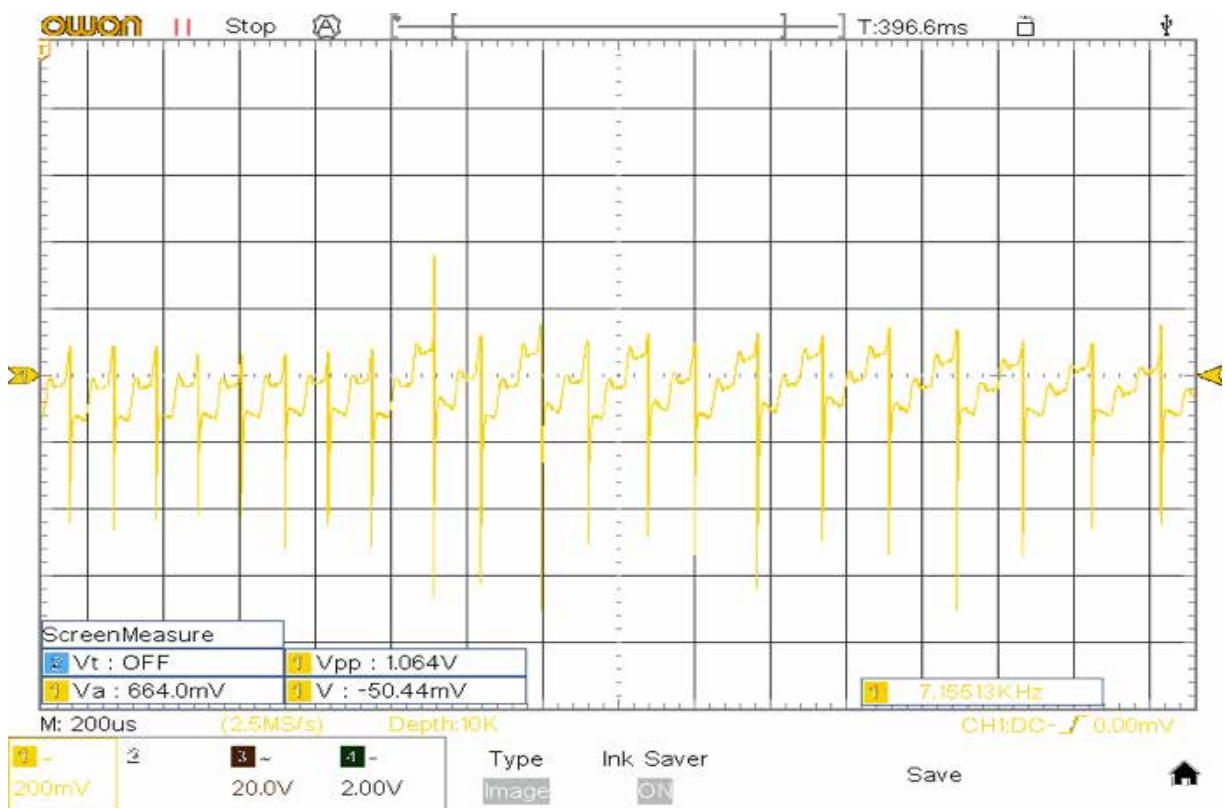


Рис 4.1 Експериментальна осцилограма під час стабілізованого горіння вуглеводневої суміші.

Отримана осцилограма демонструє помітну періодичну структуру з доволі плавним згасанням огинаючої імпульсу напруги, що підтверджує загальну стабільність розрядного каналу. Суттєво збільшена від'ємна амплітуда виникає через те, що після падіння напруги до нуля енергія, накопичена в індуктивності, продовжує переміщення заряду через коло. У результаті чого конденсатор постійно заряджається, створюючи більш помітний негативний пік напруги. Загалом така поведінка є нормальною враховуючи недодемпфований RLC контур. Також помітно що після початкових нестабільностей форма імпульсу загалом стабільна під час горіння суміші та доволі швидко відновлює регулярність послідовних коливань, хоч з дещо меншою амплітудою ніж в холостому режимі.

При порівнянні з математично змодельованою версією на рисунку 4.2

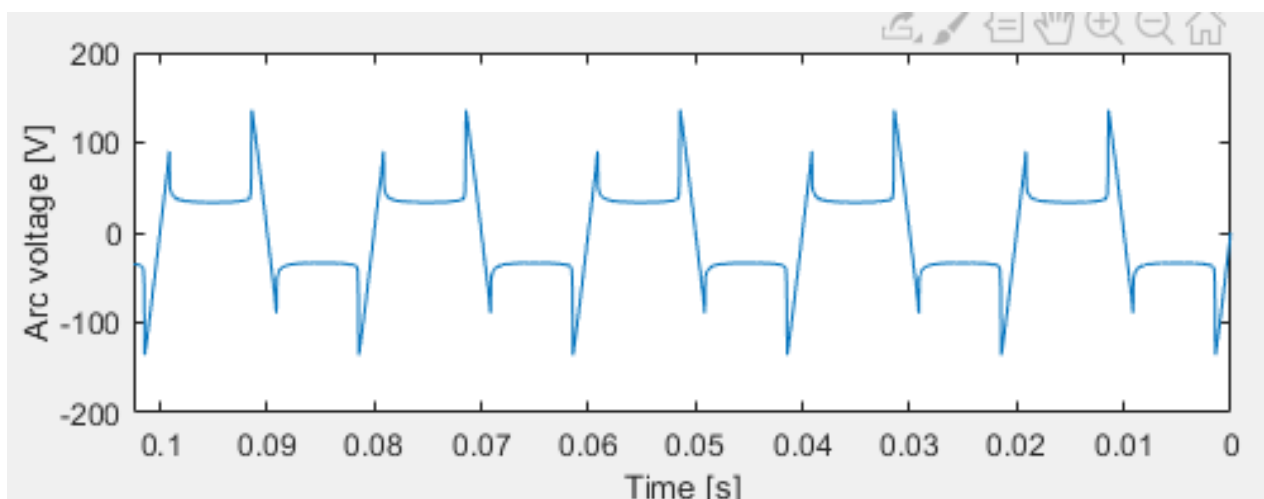


Рис 4.2 Осцилограма під час спалювання вуглеводневої суміші змодельована в середовищі MATLAB.

Ми бачимо загальну схожість форму імпульсів експериментальної моделі з теоритичною. Певні відмінності викликані по причині нестабільності джерела що створює імпульси, та через каскад помножувачів який створює додаткові шуми на осцилограмі.

Після запалювання вуглеводневої суміші навколо дуги утворюється стабільний факел з полум'я. Через це напруга пробою зменшується відносно золостого режиму з приблизно 15 кВ до 12 кВ, також змінилася частота з приблизно 7,2 кГц до 8,5 кГц. Коефіцієнт згасання в даній ситуації знаходився в

значеннях близько $1,55 \cdot 10^4$ що доволі близько до холостого режиму статичного повітря.

Цікаво що як видно на рис 4.3 після цифрової фільтрації помітно відновлюється періодичність коливань що свідчить про придушення хаотичних процесів які були помітно при відсутності суміші.

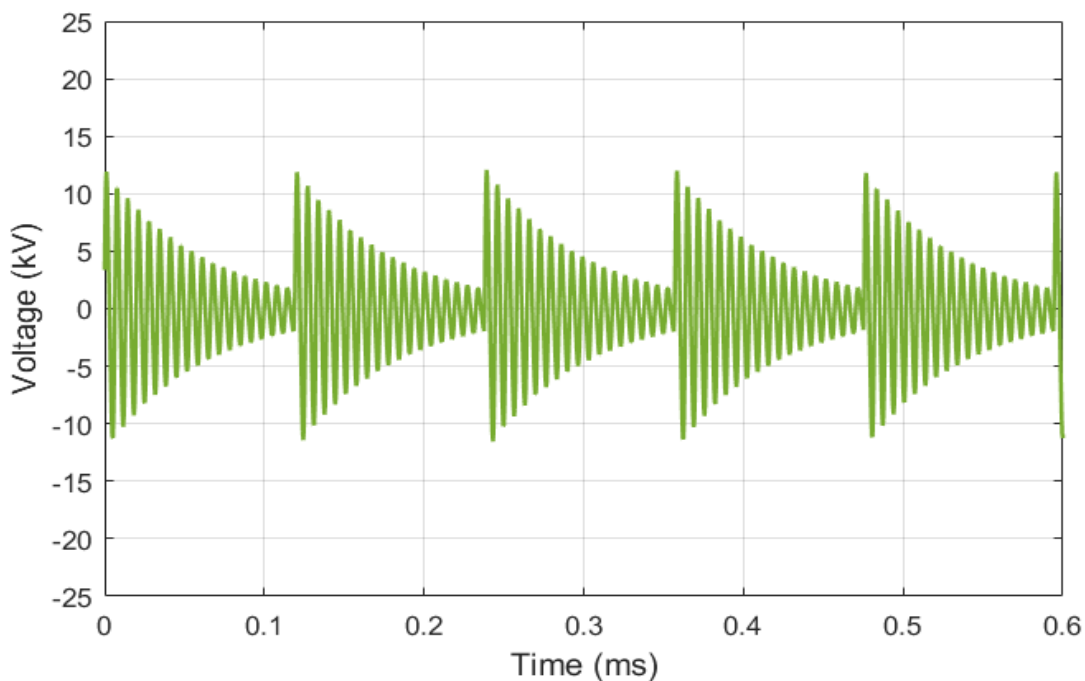


Рис 4.3 Осцилограма розрядного імпульсу під час спалювання вуглеводневої суміші після цифрової фільтрації.

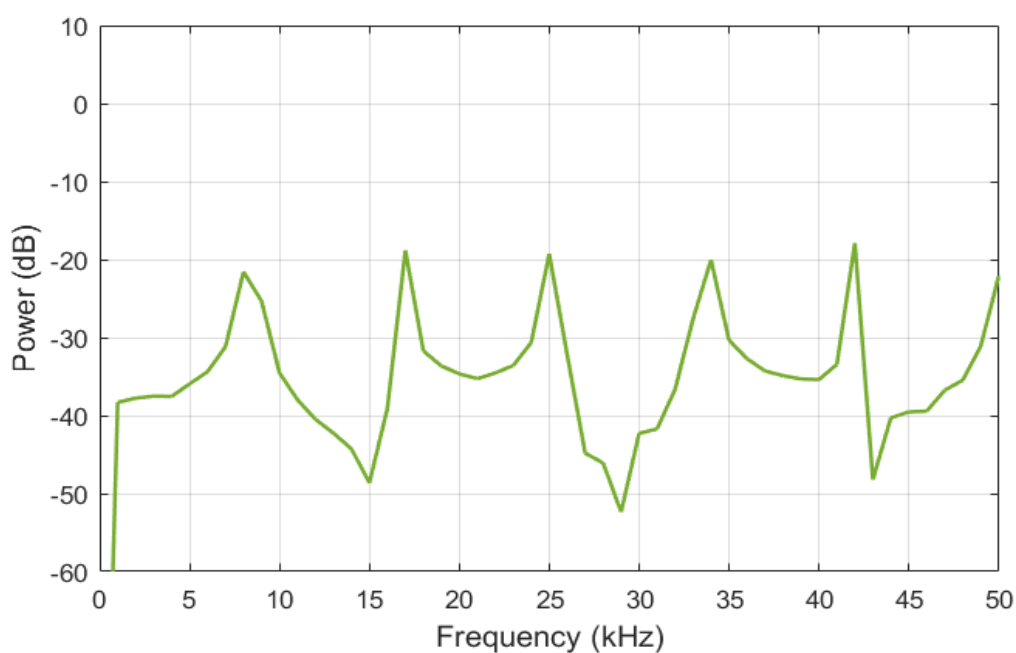


Рис 4.4 Спектр сигналу при горінні суміші.

Аналіз осцилограми сигналу демонструє, що осцилограма має форму класичної затухаючої синусоїди

Однією з характерних рис цього процесу є ізохронність, яка проявляється у стабільності періоду коливань, що залишається майже незмінним протягом усього імпульсу. Водночас амплітуда поступово зменшується, підпорядковуючись експоненційному закону.

Що і можна спостерігати на рисунку 4.4.

Також фазовий портрет що зображений на рисунку 4.5 демонструє чіткий замкнений контур, що характерний для стійких граничних циклів. Основний механізм стабілізації в цьому випадку є тепловим: екзотермічна реакція окиснення вуглеводнів генерує значну кількість тепла, формуючи тепловий канал із високою провідністю. Завдяки цьому гарячий газ набуває суттєво меншої густини та покращених характеристик рухливості носіїв заряду, що в свою чергу сприяє стабільності горіння дуги. У результаті ми отримаємо систему що переходить у стан самоорганізації, забезпечуючи динамічну рівновагу між нагрівом, виділенням тепла під час хімічної реакції та відведенням тепла.

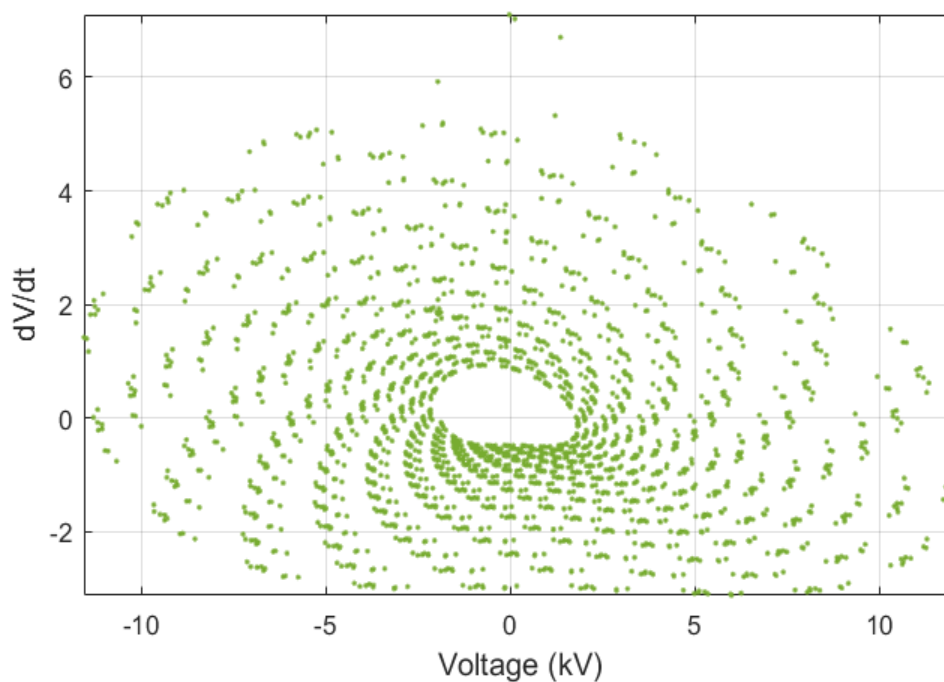


Рис 4.5 Фазовий портрет при спалюванні вуглеводневої суміші.

Фактичне значення напруги між електродами розраховувалося за формулою $U_{\text{реал}} = U_{\text{осц}} \cdot K$, де коефіцієнт K визначається як $((R_1 + R_2)/R_2) \cdot 10$, що приблизно дорівнює $1,44 \cdot 10^4$. У цьому контексті один поділ вертикальної шкали осцилографа (з параметром 1 В/див) відповідає приблизно 14,4 кВ у проміжку між електродами. Хоча максимальна частота дискретизації приладу досягає 1 ГГц, для реєстрації низькочастотних процесів на обраній часовій розгортці була використана частота дискретизації 2,5 МГц. Такий підхід забезпечує достатню точність для коректного аналізу спектру методом швидкого перетворення Фур'є (FFT) до частоти 1 МГц. Обробка сигналу з метою визначення домінуючої частоти та спектрального складу виконувалася із застосуванням вбудованої функціональності FFT осцилографа.

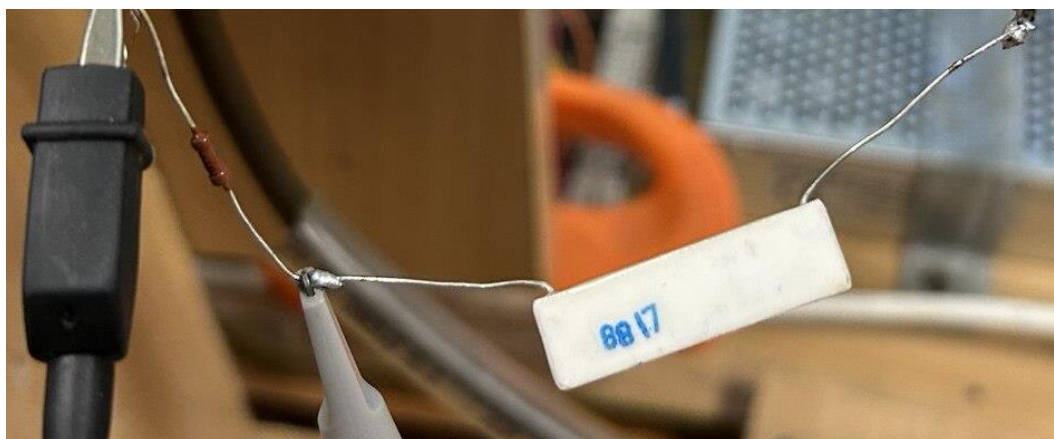


Рис. 4.6 Подільник напруги.

Висновки до розділу

1. Аналіз осцилограм що були отримані під час спалювання вуглеводневої суміші, продемонстрував виразну періодичну структуру. Це свідчить про стабільність ковзного розрядного каналу. Додатково, цифрова фільтрація сигналів підтвердила ефективне пригнічення хаотичних процесів, характерних для системи за умови відсутності пальної суміші.
2. Встановлено що формування стабільного факела полум'я навколо розрядної дуги сприяє суттєвому зниженню напруги пробою: замість приблизно 15 кВ у холостому режимі вона падає до 12 кВ. Також спостерігається зростання частоти коливань із 7,2 кГц до 8,5 кГц. Коефіцієнт згасання при цьому дорівнює

близько $1,55 \times 10^4$, що практично відповідає параметрам, характерним для холостого режиму в статичному повітрі.

3. Доведено що основний механізм стабілізації розряду пов'язаний із тепловими процесами. Під час екзотермічної реакції окиснення вуглеводнів виділяється тепло, яке формує канал із підвищеною провідністю. У цьому каналі гаряча газова суміш має нижчу густину та забезпечує вищу рухливість носіїв заряду.

ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз сучасного стану досліджень процесів спалювання вуглеводневих сумішей з використанням електротехнологій. Проаналізовані світові тренди та існуючі методи, що забезпечують інтенсифікацію процесів горіння.
2. На основі аналізу встановлено що ефективним методом інтенсифікації процесу спалювання бідних паливно-повітряних сумішей є використання електричного ковзного розряду.
3. Проведені експериментальні дослідження для визначення впливу електрофізичних характеристик ковзного розряду на стабільність спалювання вуглеводневої суміші
4. Встановлено, що після початкових нестабільностей форма розрядного імпульсу набуває вигляду затухаючої синусоїди, що підтверджує стабільність розрядного каналу. Далі спостерігається чіткий замкнений контур фазового портрета, що свідчить про придушення хаотичних процесів та перехід системи до стійких граничних циклів.
5. Розроблено математичну модель розрядного процесу, яка базується на стандартному RLC контурі, та виконано комп'ютерне моделювання частотно-регульованого електропривода вентилятора у середовищі MATLAB. У результаті аналізу розв'язків математичної моделі і порівняння її з отриманими експериментальними даними визначено розрахункові значення індуктивності і ємності для розрядного проміжку робочої зони плазмотрона. Також підтверджено загальну відповідність форми теоретичних імпульсів експериментально отриманим результатам
6. За результатами проведених вимірювань встановлено, що в процесі формування стабільного факела полум'я напруга пробою знижується з приблизно 15 кВ у режимі холостого ходу до 12 кВ. При цьому частота коливань зростає з 7,2 кГц до 8,5 кГц, а коефіцієнт згасання складає близько $1,55 \times 10^4$.

7. На відміну від існуючих світових патентів (наприклад, компаній Acutronic Turbines чи Eldor Corporation), які зосереджені на аерокосмічній галузі та високих тисках, це дослідження адаптувало технологію ковзного розряду для сільськогосподарської сфери та промислових пальників загального призначення. Та враховуючи розрахунок приводу почала реалізацію створення системи розумного пальника з покращеними характеристиками в порівнянні з наявними на ринку. А використання каскадного помножувача напруги сприяло забезпеченню стабільного запалювання розряду навіть за умов зміни характеристик середовища.
8. Побудова фазового портрета системи виявила перехід до стійких граничних циклів. Доведено що стабілізація відбувається за рахунок теплового механізму: екзотермічна реакція створює канал із високою провідністю та покращеною рухливістю носіїв заряду. Що дозволяє дійти до висновків що використання ковзного розряду покращило характеристики спалювання суміші в стабільних контрольованих умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. «Properties of a secondary discharge plasma supported by a rotating gliding discharge» (2023/2024). *Problems of Atomic Science and Technology*. https://www.researchgate.net/publication/376571503_PROPERTIES_OF_A_SECONDARY_DISCHARGE_PLASMA_SUPPORTED_BY_A_ROTATING_GLIDING_DISCHARGE
2. «Experimental and Numerical Investigations of Plasma Ignition Characteristics in Gas Turbine Combustors». https://www.researchgate.net/publication/392855003_Eksperymentalni_doslidzenna_plazmovogo_intensifikatora_dla_dvopalivnoi_kameri_zgoranna_gazotu_rbinnogo_dviguna
3. «Plasma-assisted combustion (PAC): Principles and applications». <https://www.researchgate.net/profile/Christophe-Laux>
4. **US12037948B2** (2022–2024). «Plasma ignition and combustion assist system for gas turbine engines». <https://patents.google.com/patent/US12037948B2/en>
5. **EP 2022** (активний у 2026). Система інтеграції плазмового розряду безпосередньо в котушку запалювання. <https://www.patsnap.com/resources/blog/rd-blog/plasma-assisted-combustion-technology-2026-patsnap-eureka/>
6. Raizer Y. P. Gas Discharge Physics / ed. by J. E. Allen. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1991. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-61247-3>
7. Стаття: Математична модель коронного розряду для оцінки впливу на резонансні перенапруги DOI: [10.20998/EREE.2025.2\(11\).345779](https://doi.org/10.20998/EREE.2025.2(11).345779)
8. Numerical Modeling and Investigation of Streamer Breakdown in a Coaxial Plasma Torch Based on Townsend Processes / N. Zablodskiy et al. 2024 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET), Dubai, United Arab Emirates, 27–28 December 2024. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.1109/iceet65156.2024.10913556>
9. Upscaling Plasma-Based CO₂ Conversion: Case Study of a Multi-Reactor Gliding Arc Plasmatron / C. O’Modhrain et al. ACS Engineering Au. 2024. URL: <https://doi.org/10.1021/acsengineeringau.3c00067>.

10. **NeonPro Power Supply.** Electronic Transformer Model NP-12000-30: Technical Specifications and User Manual. Hyrite Lighting Co., 2022.
11. **Eldor Corporation S.p.A.** Intelligent ignition systems utilizing sliding discharges for internal combustion engines. *European Patent Application*, 2024.
<https://www.patentguru.com/assignee/eldor-corporation-s-p-a?page=2>
12. Куліченко В. В., Махонін М. В., Кузьминський Б. Ozon generator model: thesis. 2017. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/33992>
13. Thomson J. J. On a theory of the electric discharge in gases. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. URL: <https://doi.org/10.1080/14786448308627378>
14. Three-Electrode Sliding Nanosecond Dielectric Barrier Discharge Actuator: Modeling and Physics <https://doi.org/10.2514/1.J055473>
15. Integrated design and performance optimization of three-electrode sliding discharge plasma power supply
https://www.researchgate.net/publication/382607119_Integrated_design_and_performance_optimization_of_three-electrode_sliding_discharge_plasma_power_supply
16. Zablodskiy, N., Kovalchuk, O., Kovalchuk, S., & Nasieka, I. (2024, December). Numerical Modeling and Investigation of Streamer Breakdown in a Coaxial Plasma Torch Based on Townsend Processes. In 2024 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET) (pp. 1-5). IEEE.
17. Петрушин В.С., Рябінін С.В., Якимець А.М. Програмний продукт "DIMASDrive". Програма аналізу роботи, вибору та проектування асинхронних короткозамкнених двигунів систем регульованого електроприводу (свідectvo про реєстрацію програми ПА №4065).
https://library.kpi.kharkov.ua/files/JUR/ee_2016_4.pdf
18. https://library.kpi.kharkov.ua/files/JUR/ee_2016_4.pdf
19. The breakdown mechanisms in electrical discharges: The role of the field emission effect in direct current discharges in microgaps / M. Radmilović-Radjenočić et al. *Acta Physica Slovaca*. 2013. Vol. 63, no. 3. P. 105–205. URL: <https://doi.org/10.2478/apsrt-2013-0003>
20. Corona discharge ozonizers with vacuum coatings and their use for processing agricultural products / M. P. Parpiyev et al. *IOP Conference Series: Earth and*

Environmental Science. 2023. Vol. 1142, no. 1. P. 012016. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1142/1/012016>

21. Loeb L. B. Fundamental processes of electrical discharge in gases. New York : J. Wiley, 1939. 717 p.
22. Raizer Y. P. Gas Discharge Physics / ed. by J. E. Allen. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1991. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-61247-3> (date of access: 07.05.2024).
23. Gilbert W. Tractatus, sive, Physiologia nova de magnete : magneticisq; corporibus et magno magnete tellure sex libris comprehensus. Sedini : typis G tzianis.
24. Техніка високих напруг / [А. В. Василець та ін.]. Рівне : НУБГП, 2021.
25. Ombrello T. et al. Magnetic enhancement of flame propagation in gliding arc plasma assisted combustion // *Combustion and Flame*. 2010. Vol. 157, No. 10. P. 1906–1915.
26. Ju Y., Sun W. Plasma assisted combustion: Dynamics and chemistry // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2015. Vol. 48. P. 21–83.
27. RLC circuit natural response: explanation of volt-age overshoot. Spinning Numbers. Available at: <https://spinningnumbers.org/a/rlc-natural-response-derivation.html>.