

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

КАРПАЛЮК ІГОР ТИМОФІЙОВИЧ



УДК 621.31

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ОЦІНКИ ВПЛИВУ
КОРОННОГО РОЗРЯДУ НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття вченого ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизації та кібербезпеки енергосистем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», МОН України.

Науковий консультант

доктор технічних наук, професор
Гриб Олег Герасимович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри автоматизації та
кібербезпеки енергосистем.

Офіційні опоненти :

доктор технічних наук, професор,
Назаренко Ігор Петрович,
Таврійський державний агротехнологічний
університет імені Дмитра Моторного МОН
України (м. Мелітополь), декан факультету
енергетики і комп'ютерних технологій;

доктор технічних наук, доцент
Папайка Юрій Анатолійович,
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка», завідувач
кафедри електроенергетики;

доктор технічних наук, професор
Мороз Олександр Миколайович,
Харківський національний технічний
університет сільського господарства імені
Петра Василенка, професор кафедри
Електропостачання та енергетичного
менеджменту.

Захист відбудеться « 08 » квітня 2021р, о 14:00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут».

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

Автореферат розісланий « 05 » березня 2021р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 64.050.04



Володимир ІВАХНО

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Перехід України до європейських інституцій розкриває перед нашою країною можливість вийти в європейський ринок. Але вимоги до товарів європейського рівня значно вищі тих норм що використовуються зараз в Україні. Один із най важливих товарів для України є електрична енергія. Система електропостачання України дуже потужна, і Україна може поставити достатню кількість такого товару як електрична енергія в країни Європи. Що може стати базисом для становлення і підйому економіки самої України. Але вимоги до якості товарів стосуються і вимог до якості електропостачання. Звідси виникають і відповідні вимоги до енергетичного комплексу по задовільненню критеріїв якості Європейського ринку.

На даний час постає питання в подальшому підвищенні якості електричної енергії, щоб відповідати європейським стандартам. А нормуємі в них показники, вже торкаються не тільки параметрів самої електричної енергії, а й параметрів мережі, параметрів схеми і режиму мережі, а також споживачів. Тому було запропоновано перейти від суто якісних параметрів електричної енергії до параметрів електропостачання як більш охоплюючого поняття, в якому якість електричної енергії буде включена як складова. Дана робота присвячена визначенню чинників які впливають на показники якості електропостачання при нормальних режимах роботи системи.

Якісні параметри електропостачання і якість електричної енергії, як елемента електропостачання, стала предметом досліджень відомих вчених, серед яких, слід виділити Шидловський А.К., Жаркін А.Ф., Сокол Є.І., Жежеленко А.Д., Гриб О.Г., Железко Ю.С., Стогній Б.С., Новський В.О., і інші.

З точки зору якісних показників електропостачання впливовим явищем є коронний розряд, бо він існує при нормальних режимах роботи системи і впливає на спрацювання релейного захисту, може стати джерелом умов для виникнення дугового розряду і є одним із чинників зміни безперебійності, впливає на втрати електричної енергії, чине вплив на обладнання мережі.

Так, згідно з даними Electric Power Research Institute (EPRI) в США, збільшилася кількість відмов полімерних ізоляторів на лініях електропередачі 115 і 138 кВ. Дослідження EPRI показали, що ці збої пов'язані з постійним впливом на ізоляцію коронних розрядів.

Вивченням коронного розряду займалися такі вчені як: Александров О.П., Сканаві Г.І., Капцов Н.А., Попков В.І., Левітов В.І., і інші.

Виходячи із особливостей коронного розряду, він здебільшого враховувався як паразитний споживач потужності. В даній роботі звернуто увагу на зв'язок коронного розряду і погіршення якісних показників електропостачання. В роботі запропоновано визначати наявність коронного розряду і його координати для можливості проведення заходів по його усуненню.

Дистанційні засоби по визначенню наявності коронного розряду є актуальними і такі технології розвиваються. Вже відомі і використовуються на

практиці методи визначення наявності коронного розряду за ультрафіолетовим випроміненням, за інфрачервоним випроміненням, за наявним електромагнітним фоном, за наявністю хімічних сполук. Дистанційні методи контролю ізоляторів мають недоліки, які не дозволили витіснити візуальний огляд електричного обладнання, а лише, доповнили його. У той же час поверхові огляди не завжди дозволяють виявити дефекти, так як в більшості випадків коронні розряди не видно.

Отже, має місце актуальна наукова проблема, пов'язана з недостатньою ефективністю існуючих сьогодні методів визначення наявності коронного розряду. Аналіз виявив необхідність розробки і дослідження нових методів визначення наявності коронного розряду і його координат. Такі методи мають бути дистанційними, гальванічно розірваними із мінімальним впливом сторонніх факторів, таких як, погодні умови, години доби і інші. В даній роботі наявність коронного розряду і його координати запропоновано визначати по його акустичному випроміненню. Запропоновано вирішення зазначеної проблеми на основі методів спектрального аналізу акустичних шумів, що супроводжують коронний розряд.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі «Автоматизація та кібербезпека енергосистем» НТУ «ХПІ» згідно плану держбюджетної НДР МОН України: «Розробка пріоритетних напрямів цифрової енергетики» (ДР № 0119U0025), у якій здобувач був відповідальним виконавцем.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є вирішення важливої науково-технічної проблеми створення та вдосконалення методів і засобів контролю параметрів якості систем електропостачання, що дозволить підвищити достовірність контролю і діагностики стану систем електропостачання при обмеженнях на обсяг вимірювальної інформації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1) Визначити можливі фактори, що впливають на якість електропостачання: визначити вплив коронного розряду на показники якості електропостачання; визначити вплив різних чинників на появу коронного розряду.

2) Визначити залежність між енергією в просторі і коронним розрядом: визначити залежність коронного розряду і його акустичного випромінення; розробити математичну модель акустичного випромінення коронного розряду; розробити метод визначення наявності коронного розряду за акустичним випроміненням; розробити методику розпізнавання наявності коронного розряду нерухомим і пересувним приладом.

3) Розробити метод пошуку координат коронного розряду, як джерела звуку: розробити методику пошуку координат коронного розряду нерухомим і пересувним приладом; розробити методику пошуку координат коронного розряду при наявності перешкод екрануючих акустичні випромінення; розробити методику пошуку координат коронного розряду при урахуванні швидкості пересувної платформи із врахуванням ефекту Доплера.

4) Розробити методику, що дозволяє виявити зміну безперебійності електроенергетичної системи через частоту оглядів за участі безпілотних літальних апаратів.

5) Провести експериментальні перевірки розроблених методів і оцінок.

Об'єктом дослідження є процес підтримання якісних показників електропостачання під час передачі електричної енергії в системі електропостачання.

Предметом дослідження є методи визначення наявності коронного розряду, який є одним із чинників погіршення якісних параметрів електропостачання.

Методи дослідження. Основні теоретичні положення дисертації базуються на методах теорії електричних кіл та лінійної алгебри для розрахунків параметрів схем систем електропостачання, на фізичних явищах в вакуумі і газах, на методах спектрального аналізу побудованих на перетвореннях Фур'є, на використанні фундаментальних положень теорії інформації, теорії ймовірності та основах теорії вимірювань.

При проведенні вимірювального експерименту використовувалися елементи інформаційної теорії вимірювань, методи математико-статистичної обробки даних та методи математичного аналізу числових рядів.

Теоретичні методи досліджень підтверджені математичним моделюванням у обчислювальному середовищі пакета Matlab.

Експериментальні дослідження проводились із застосуванням обчислювальних методів статистики та спектральних перетворень у спеціалізованих програмних пакетах MathCad та MatLab.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- вперше запропоновано метод пошуку координат коронного розряду за акустичним випроміненням, що дозволило розробити засади для засобів автоматичного визначення координат коронного розряду;

- вперше запропоновано метод визначення наявності коронного розряду за спектром акустичного випромінення коронним розрядом, що дозволяє визначити наявність коронного розряду безконтактним способом;

- отримала подальший розвиток теорія походження гармонічних складових в електричному струмі, яка, на відміну від відомих, дозволила визначити коронний розряд – як одне із джерел гармонічних складових при нормальному стані роботи електроенергетичної системи;

- отримала подальший розвиток модель коронного розряду, а саме виявлені залежності спектру акустичного випромінення коронного розряду, що дозволяє отримати математично обґрунтовані акустично-енергетичні залежності.

Практичне значення одержаних результатів для електричної інженерії полягає у:

- розробці та застосуванні універсальної методики поліпшення якісних параметрів електропостачання за рахунок використання методу акустичного

визначення параметрів, що дозволило використовувати гальванічно розірвані методи моніторингу стану електроенергетичного обладнання;

– розробці та застосуванні методу визначення наявності коронного розряду шляхом проведення акустичного спостереження із подальшим спектральним аналізом акустичних шумів та визначення спектральних груп які належать до коронного розряду, що дозволило визначати наявність коронного розряду при різних погодних умовах і в різні години доби.

Практичне значення для приладобудування складають підходи та рекомендації до побудови моделей та планів вимірюваних комплексів та проведення на їх основі апаратного моніторингу та діагностики стану системи електропостачання, у вигляді пакету програмного забезпечення, а також у виді розроблених технічних приладів чи їх складових, що дозволяє створювати прилади акустичної діагностики системи електропостачання.

Вирішено практичну проблему з автоматизації процедури визначення наявності і координат коронного розряду в довільну годину доби при любых погодних умовах, що дозволяє ідентифікувати коронний розряд і значно знижує витрати на пошук одного з чинників зміни якісних показників електропостачання.

Результати роботи впроваджені в ПАТ «Укргідропроєкт» (м. Харків), при проведенні обстеження елементів системи електропостачання, в ТОВ «Харківське спеціалізоване монтажно-експлуатаційне підприємство», при аналізі наявності коронного розряду в системі електропостачання, у навчальному процесі кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем Національного технічного університету «Харківського політехнічного інституту» при викладанні курсу «Технології, проблеми та перспективи розвитку галузі».

Розроблено інформаційно-вимірювальну технологію визначення наявності та розташування коронного розряду, на обладнанні високої і надвисокої напруги, незважаючи на режими роботи системи електропостачання.

Запропонована технологія та метод дозволяють планувати діагностику системи електропостачання, а також створювати прилади діагностики побудовані на акустичному методі. На основі запропонованих підходів та методів розроблено інформаційну технологію отримання нової діагностичної інформації, що побудована на методах аналізу часових рядів.

Запропонований метод акустичної діагностики дозволяє використовувати стандартні, найрозповсюдженіші технічні засоби. Розроблено акустично діагностуючу систему, яка дозволяє проводити експрес-діагностику при встановленні навіть на платформах, що пересуваються і мають значну швидкість руху. Результати експериментальних досліджень розробленої системи показали її відповідність технічним вимогам та можливість отримання діагностичної інформації при гальванічно незалежному діагностуванні.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є завершеною науковою працею автора. Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто.

Автором визначено напрямок, розроблено методологію, програми і методи дослідження; здійснено вибір об'єктів досліджень. Автором сформульована задача визначення окремих якісних показників електропостачання. Автором на огляді літератури зроблено висновок щодо впливу коронного розряду на якісні показники електропостачання. Показана важливість пошуку наявності коронного розряду і його координат. Автором показано недоліки існуючих методів виявлення коронного розряду за оптичними, електромагнітними, хімічними збуреннями. Автором запропоновано метод визначення наявності коронного розряду за акустичними шумами від коронного розряду. Проведено експеримент по виявленню наявності акустичних шумів коронного розряду. Проведено аналіз спектральних акустичних випромінень коронного розряду і визначені відповідні спектральні групи, що належать коронному розряду. Проведено перевірку працездатності акустичного методу на звукових доріжках виконаних сторонніми виконавцями. Розроблено метод визначення наявності коронного розряду по його акустичному випроміненню. Пристосовано метод пошуку координат акустичного джерела до пошуку координат коронного розряду. Розроблено методику пошуку джерела коронного розряду за допомогою обладнання розташованого на рухомій платформі. Проведено підтвердження можливості використання в якості платформи БПЛА. Проведено економічні розрахунки використання БПЛА для моніторингу системи електропостачання.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації, результати та висновки обговорено на: Регіональних міжнародних науково-технічних конференціях: Менеджмент міського і регіонального розвитку, (Харків, 2012), «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем» (Харків, 2018), MicroCAD-2019 (Харків, 2019), «Розвиток науки в ХХІ столітті», (Харків, 2019), «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем», (Харків, 2019).

Публікації. Основні наукові положення і результати досліджень по темі дисертаційної роботи опубліковано в 29 наукових працях: 2 – монографії у співавторстві; 20 статей у наукових фахових виданнях України (з яких 2 – у закордонних фахових наукових виданнях англійською мовою, 1 – у наукометричній базі Scopus), 2 – патенти України на корисну модель, та 5 – у матеріалах конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і п'яти додатків. Повний обсяг дисертації складає 333 сторінки, у тому числі: 265 сторінок основного тексту, 267 найменувань використаних джерел на 25 сторінках, 4 додатки на 41 сторінці. Основний текст містить 27 таблиць по тексту. Роботу ілюстровано 149 рисунками по тексту, та 17 рисунків на 8 окремих сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та основні завдання дослідження, наведено відомості щодо зв'язку роботи з науковими програмами, стисло викладено отримані результати, висвітлено наукову новизну, практичне значення отриманих результатів, відзначено методи досліджень, особистий внесок здобувача у спільних публікаціях, висвітлено кількість опублікованих наукових праць і показники структури та обсягу дисертації.

У першому розділі Приведено огляд літератури з розвитку підходів до якості електропостачання. В Україні за теперішніми нормативами нормується якість електричної енергії, це стандарти EN50160 (ДСТУ EN 50160:2014), ГОСТ 13109-97. Але в сучасних умовах виникає ціла низка параметрів, які мають бути контрольовані і вони виходять за рамки показників, що можна визначати як показники якості електричної енергії. Тому було запропоновано ввести таке поняття, як якість електропостачання. Звернуто увагу на те, що якість електричної енергії, можна розглянути як один з елементів якісних показників електропостачання.

З метою дослідження факторів, що впливають на параметри якості електропостачання, було проведено заміри якості електроенергії в різних режимах роботи систем електропостачання і технологічного устаткування виконувалися виміри якості електричної енергії. Заміри виконувалися на реальних об'єктах енергетичного комплексу України в мережах із різним рівнем номінальної напруги. Приведені результати досліджень якості на різних елементах електричної мережі для напруг 220, 110, 35 кВ. Показана наявність відхилень параметрів якості електричної енергії.

Визначено, що одним із чинників, який впливає на параметри якості електропостачання є коронний розряд. Показано, що коронний розряд призводить не тільки до не зворотних втрат електричної енергії, але й, перешкоджає передаванню високочастотних сигналів, погіршує ізоляційні елементи, може стати джерелом умов для виникнення дугового розряду і є одним із чинників зміни безперервності. З аналізу літератури показано, що коронний розряд існує при нормальних режимах роботи системи, і його потужність залежить як від параметрів систем електропостачання, так і від зовнішніх факторів, таких як дощ, сніг, паморозь, туман, іней. В даній роботі звернуто увагу на зв'язок коронного розряду і погіршення якісних показників електропостачання. В роботі запропоновано підвищувати якість по декільком параметрам електропостачання, за рахунок зменшення впливу коронного розряду. Для цього необхідно визначити наявність коронного розряду і його координати, для можливості проведення заходів по його усуненню.

Зроблено висновок, що має місце актуальна наукова проблема, пов'язана з недостатньою ефективністю існуючих сьогодні методів визначення наявності коронного розряду. Аналіз виявив необхідність розробки і дослідження нових методів визначення наявності коронного розряду і визначення координат коронного розряду. Такі методи мають бути дистанційними, гальванічно

розірваними із мінімальним впливом сторонніх факторів, таких як, погодні умови, години доби і інші.

У відповідності із поставленою задачею розробки методу визначення координат коронного розряду спочатку необхідно визначити наявність коронного розряду, а потім виконувати пошук його локації.

У другому розділі розглядаються питання, пов'язані із виявленням наявності коронного розряду на елементах системи електропостачання.

Коронний розряд споживає енергію, яка перетворюється в інші види енергії (або в хімічні сполуки) і випромінюється в оточуючий простір. Показано, що питання пошуку наявності коронного розряду і визначення його місця знаходження є метою багатьох дослідників. Різними вченими було виконано ряд спроб діагностувати наявність коронного розряду по супутнім збуренням, які супроводжують коронний розряд. На рис. 1 показані зовнішні збурення від коронного розряду згруповані по типам енергії.



Рисунок 1 – Енергія коронного розряду в оточуючому середовищі

Розглянуто методи, за можливістю проведення гальванічно розірваних замірів, розподілених по збуренню середовища, а саме: за ультрафіолетовим випроміненням, за інфрачервоним випроміненням, за електромагнітним фоном, за хімічними сполуками.

За такими випроміненнями коронного розряду розроблено багато приладів для його виявлення. Показані переваги і недоліки зазначених методів пошуку коронного розряду.

Перелічені методи не дозволили вирішити поставлену задачу. Пропонується використовувати метод визначення наявності коронного розряду за механічною роботою – а саме за акустичним випроміненням.

Джерелом акустичного випромінення коронного розряду (або джерелом акустичного шуму) виступає локальне розширення, або пересування

атмосферного повітря внаслідок проходження розряду. Таке локальне розширення створює звукові коливання.

Наведено опис процесів в коронному розряді, які є джерелом акустичних випромінень, це виникнення іонного струму і струму зміщення в зовнішній зоні коронного розряду.

Багатьма авторами проводилася спроба проводити діагностику електричного обладнання по його акустичним шумам. Але здебільшого така діагностика пов'язана із виявленням механічних пошкоджень, або пов'язана із механічними параметрами самого електричного приладу.

Для перевірки гіпотези відносно зв'язку коронного розряду з його акустичним спектром було проведено лабораторне дослідження. Експериментальні заміри акустичних сигналів від коронного розряду в електричних установках проводили в малій високовольтній залі Національного технічного університету «НТУ «ХП».

Коронний розряд отримували на установці по перекриттю високовольтного підвісного ізолятора типу П-3 (із межею пробою 35 кВ). Високовольтну напругу отримували від підвищуючого трансформатора (150000/100 В), який було підключено до мережі 220 В через ЛАТр. Напругу на високовольтному трансформаторі фіксували вольтметром, який встановлено на низьковольтній обмотці. Акустичні заміри виконували групою приладів фіксуючих акустичні коливання. Основним приладом був моніторний мікрофон УМІК-1 із лінійною АЧХ, допоміжними були малогабаритні диктофони фірм Sony Walkman NWZ-B173F і Transcend і інші.

Експеримент проводили наступним чином: підвищували напругу на ізоляторі до виникнення коронного розряду. Наявність якого фіксували наочно. Перша межа напруги, для початку експерименту, контролювалася за сприйняттям оператора. Оператор відрізняв характерний шум коронного розряду і давав команду, про можливість проведення акустичного запису. Такий режим приймався за початковий для проведення запису акустичного шуму від коронного розряду. Режим залишали на термін понад 10 секунд для отримання запису без провалів і змін амплітуди. Потім оператор змінював напругу на більшу і фіксував наступний режим. Загалом запис всього експерименту проводили одним фалом. Обладнання акустичної фіксації було розташовано в зоні дії високої напруги. На проведення всього експерименту доступ людини до обладнання було обмежено. Результат фрагменту запису експерименту представлено на рисунку (рис. 2).

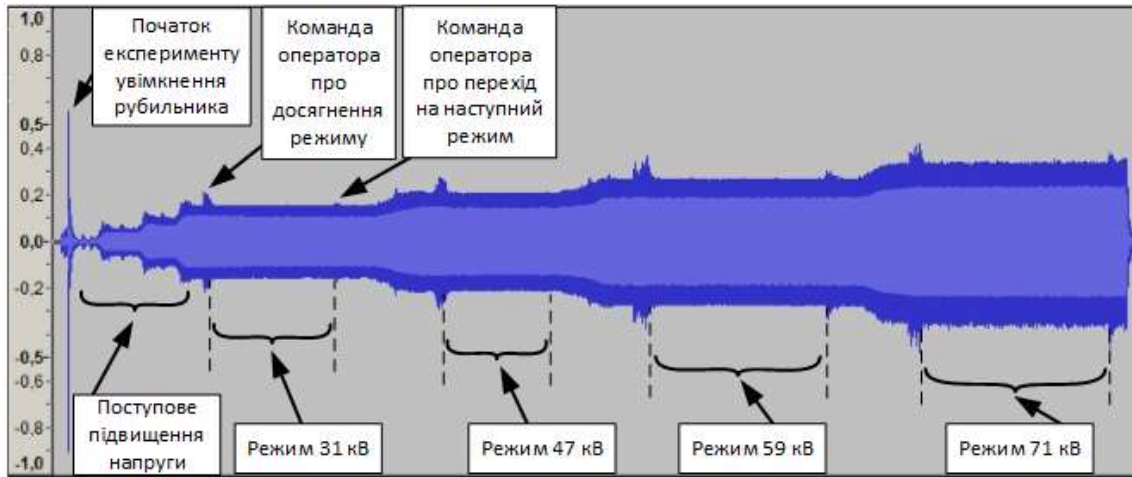


Рисунок 2 – Амплітудні значення акустичного шуму корони в залежності від напруги на короні

Із загального файлу було відокремлено тільки проміжки із рівними амплітудами, що відповідали режимам (напругам на коронному розряді). Кожен із цих фрагментів аудіо файлу було розгорнуто до періоду 50 Гц (рис. 3).

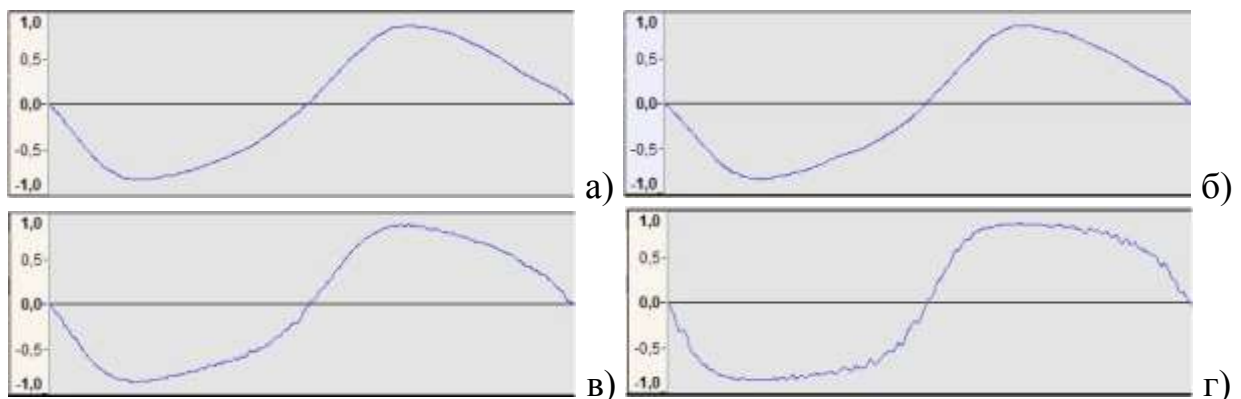


Рисунок 3 – Фрагменти аудіо сигналів розгорнуто до одного періоду, амплітуди збільшено до умовної одиниці: а – 31 кВ; б – 47 кВ; в – 59 кВ; г – 71 кВ

Кожен з аудіо фрагментів було проаналізовано на гармонічні складові. Для цього використовували розкладання в ряд Фур'є. Використовували швидке перетворення Фур'є, для отримання аналізу на всьому діапазоні частот.

Спектральну обробку виконували за допомогою програмного забезпечення MatLab.

Перший спрощений аналіз було виконано у 1024 фрагменти.

Отримані результати представлені на рис. 4, де представлені результати спектрального розкладу аудіо сигналу коронного розряду для напруг 31 кВ, 47 кВ, 59 кВ, 71 кВ.

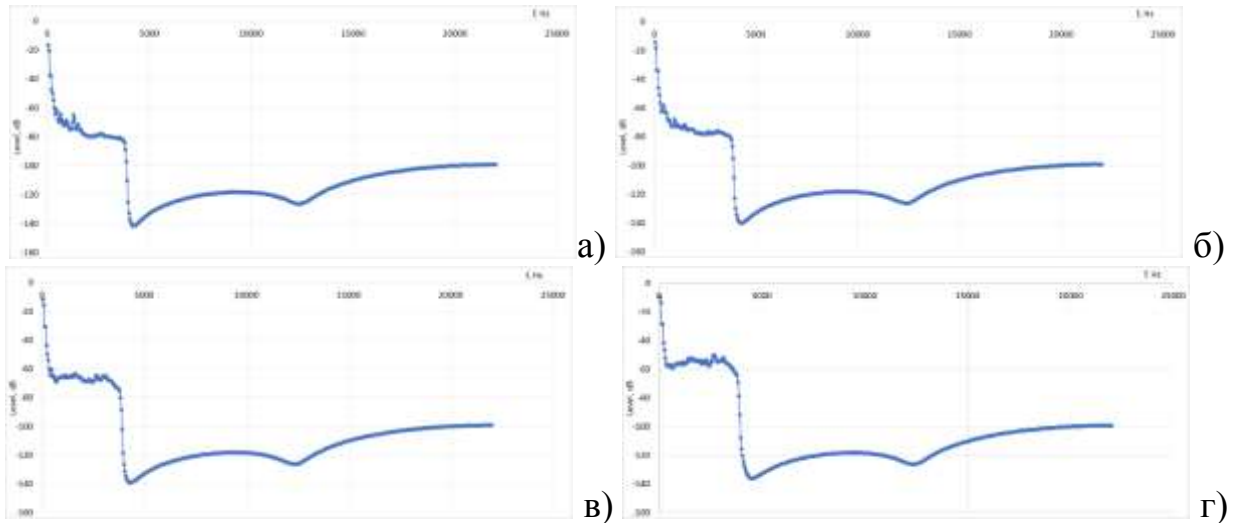


Рисунок 4 – Спектральний розподіл аудіо фрагментів у відповідності за напругою коронного розряду: а – 31 кВ; б – 47 кВ; в – 59 кВ; г – 71 кВ

На графіках (рис. 5) добре видно, що для частот більше ніж 4000 Гц форма спектральної кривої аудіо фрагментів майже однакова для різних напруг коронного розряду. При суміщенні цих кривих на одному графіку вони повністю співпадають для різних напруг

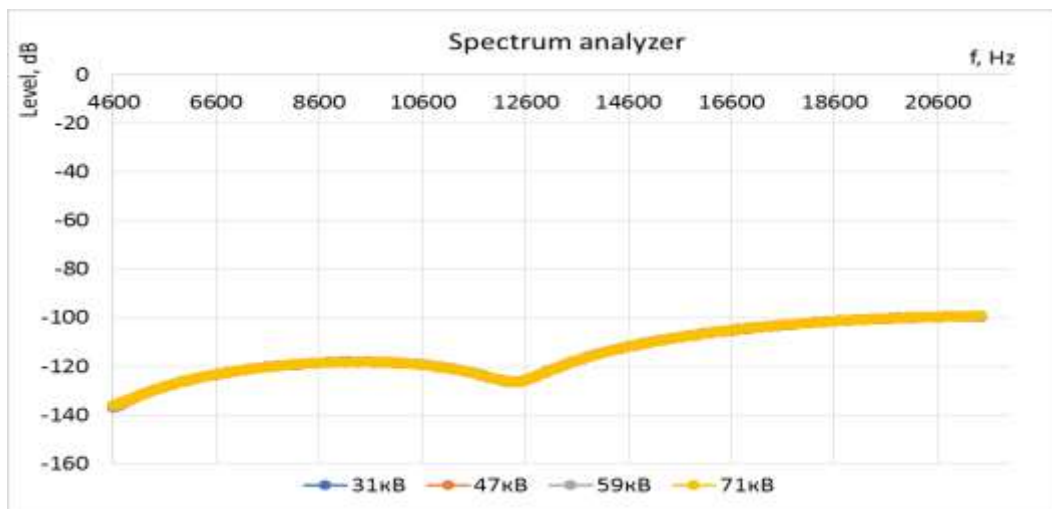


Рисунок 5 – Спектральні криві для різних напруг коронного розряду для частотного діапазону 4кГц ÷ 20 кГц

В той же час на діапазоні спектру від 0 до 4000 Гц співставлення кривих спектрів для різних напруг коронного розряду дає розбіжності які представлені на рис. 6.

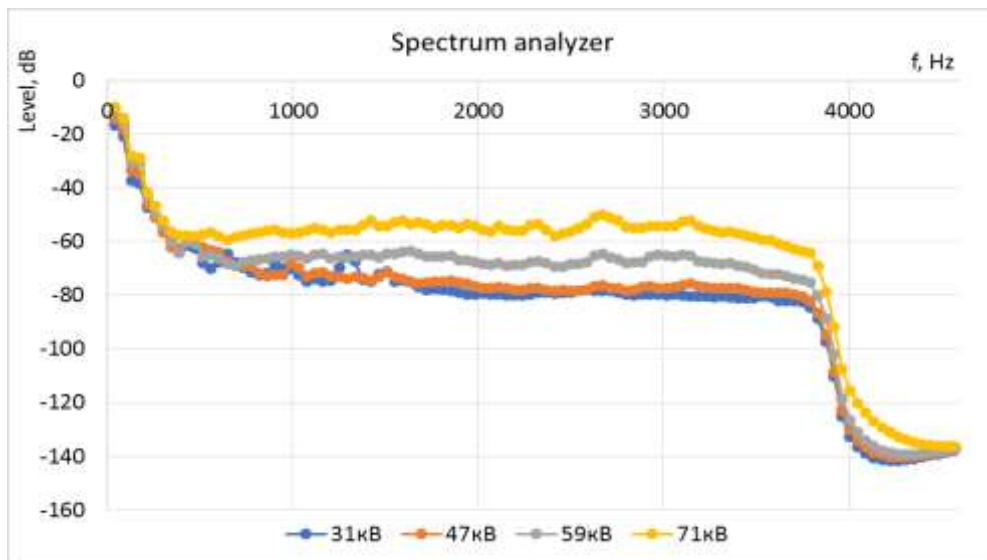


Рисунок 6 – Спектральні криві для різних напруг коронного розряду для частотного діапазону 0 Гц ÷ 4000 Гц

Діапазон частот від 0 Гц до 4000 Гц має більш відмінності в залежності від напруги коронного розряду. Можна визначити закономірність, де для більших рівнів енергії в коронному розряді крива спектральної щільності відповідно займає більш високу позицію. Але для визначення наявності коронного розряду така поведінка кривої спектральної щільності не дозволяє використовувати її як маркер. Тому було проведено більш точний аналіз на розклад Фур'є. Використано розклад із частотою вибірки 65536 Гц, і для аналізу відокремили діапазон від 0 Гц до 500 Гц (рис. 7).

Співставлення спектральних кривих від коронного розряду з різними потужностями (напругами на коронному розряді) отримали наступний графік наведений на рис. 7.

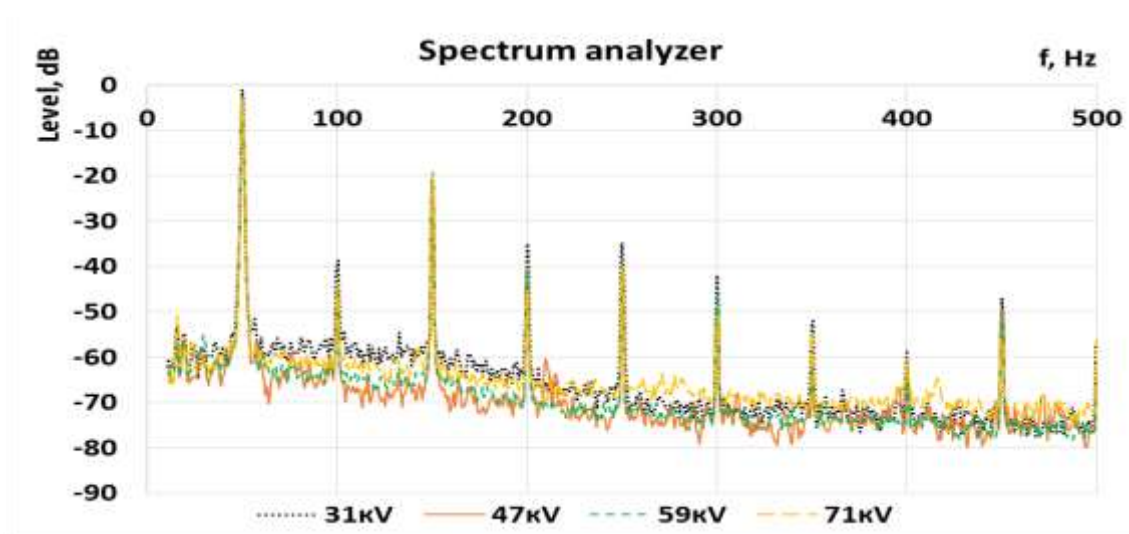


Рисунок 7 – Спектральний аналіз на діапазоні частот 0 Гц ÷ 500 Гц

При такому детальному аналізі добре видно сплески, що відповідають гармонічним складовим промислової частоти. На спектрограмі видно парні і непарні гармоніки, що створює в аудіо діапазоні коронний розряд.

Такі частотні сплески притаманні саме коронному розряду. Гармонічна складова 50 Гц (перша гармоніка) – промислова частота електричної мережі. На цій частоті працює обладнання, що підключається до мережі. Акустичні сплески на цій частоті можуть бути створені не тільки коронним розрядом, тому не приймалася до розгляду в аналізі. Добре видно, що коронному розряду притаманні лінії спектру 100, 150, 200, 250, 300, 350 Гц (інші лінії мають величини малого порядку якими можна знехтувати). На рисунку 8 показані криві частотних спектральних залежностей.

На всіх наведених графіках (рис. 7) є лінії тільки певних гармонік, і значення амплітуди за цими спектральними лініями однозначно перевищують фон, що розгорнуто показано на рис. 8. Це дає змогу сформулювати критерій наявності коронного розряду по акустичним спектральним лініям кратним гармонікам промислової частоти.

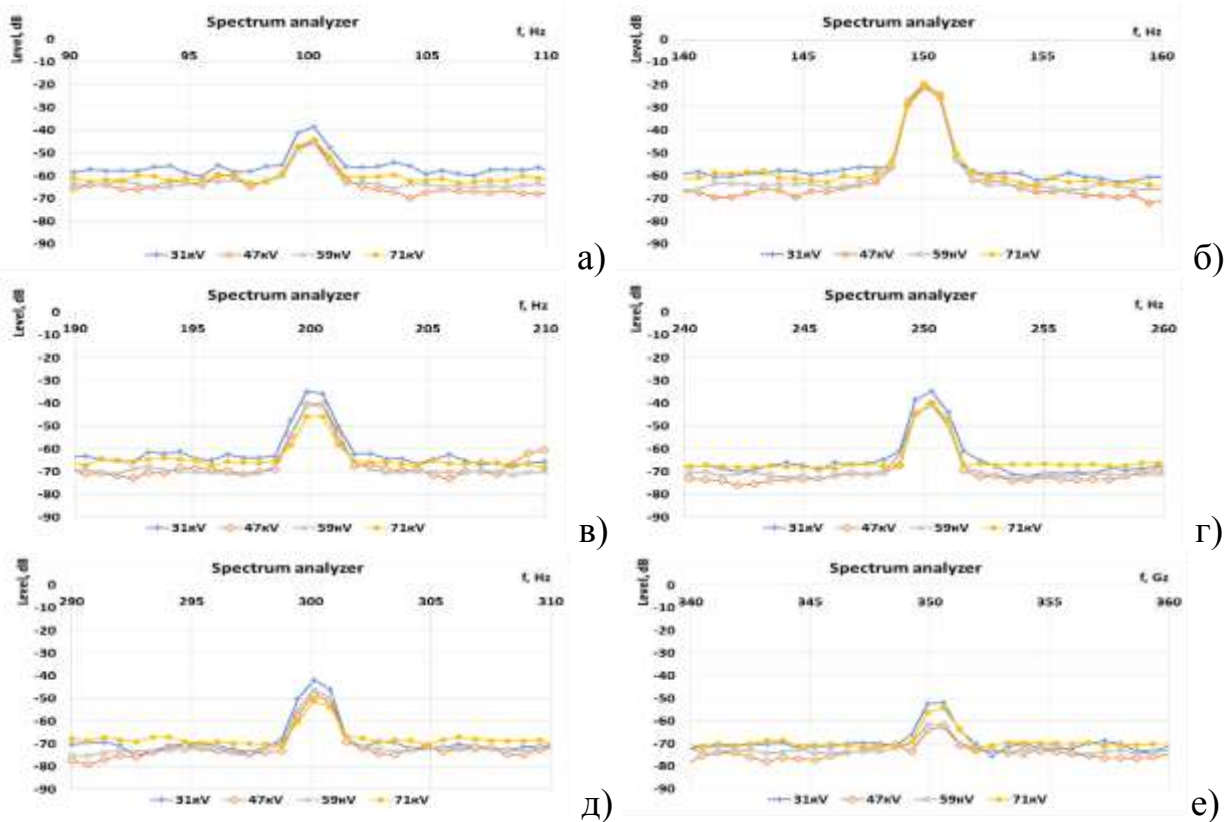


Рисунок 8 – Криві частотних спектральних залежностей для різних напруг коронного розряду в околиці частоти: а – 100 Гц; б – 150 Гц; в – 200 Гц; г – 250 Гц; д – 300 Гц; е – 350 Гц

Дослідження підтвердили наявність зв'язку акустики і коронного розряду. Аналіз показав невідповідність результатів за теоретичними прогнозом і отриманих в результаті обробки експериментальних замірів, тому

виникла потреба в проведені узагальнення та математичного моделювання. У зв'язку з чим необхідно провести математичне моделювання з метою описання акустично енергетичних залежностей коронного розряду.

У **третьому розділі**, у відповідності до поставленого завдання, було створено математичну модель спектро-акустичних залежностей коронного розряду.

За результатами обробки спектральної функції за зворотнім перетворенням Фур'є побудовано модель акустичного випромінення коронного розряду, яка отримала вигляд:

$$f(t) = A_0 + \sum_{i=2}^7 A_{mi} \sin(2\pi \cdot i \cdot f_i \cdot t + \varphi_i)$$

І в розгорнутому вигляді має вигляд

$$f(t) = A_0 + A_{m2} \sin(2\pi 100t + \varphi_2) + A_{m3} \sin(2\pi 150t + \varphi_3) + A_{m4} \sin(2\pi 200t + \varphi_4) + A_{m5} \sin(2\pi 250t + \varphi_5) + A_{m6} \sin(2\pi 300t + \varphi_6) + A_{m7} \sin(2\pi 350t + \varphi_7),$$

де A_0 – акустичні фонові шуми; f_i – частота відповідної i -ї гармоніки; $A_{m2} \dots A_{m7}$ – амплітуди з 2-ої по 7-му гармонічну складову; $\varphi_2 \dots \varphi_7$ – зсув фази з 2-ої по 7-му гармонічну складову.

За отриманою математичною моделлю було проведено відтворення кривої амплітудних значень акустичного сигналу (рис. 9) без частоти 50 Гц (бо частота 50 Гц може створюватися не тільки коронним розрядом але й іншими електричними приладами).

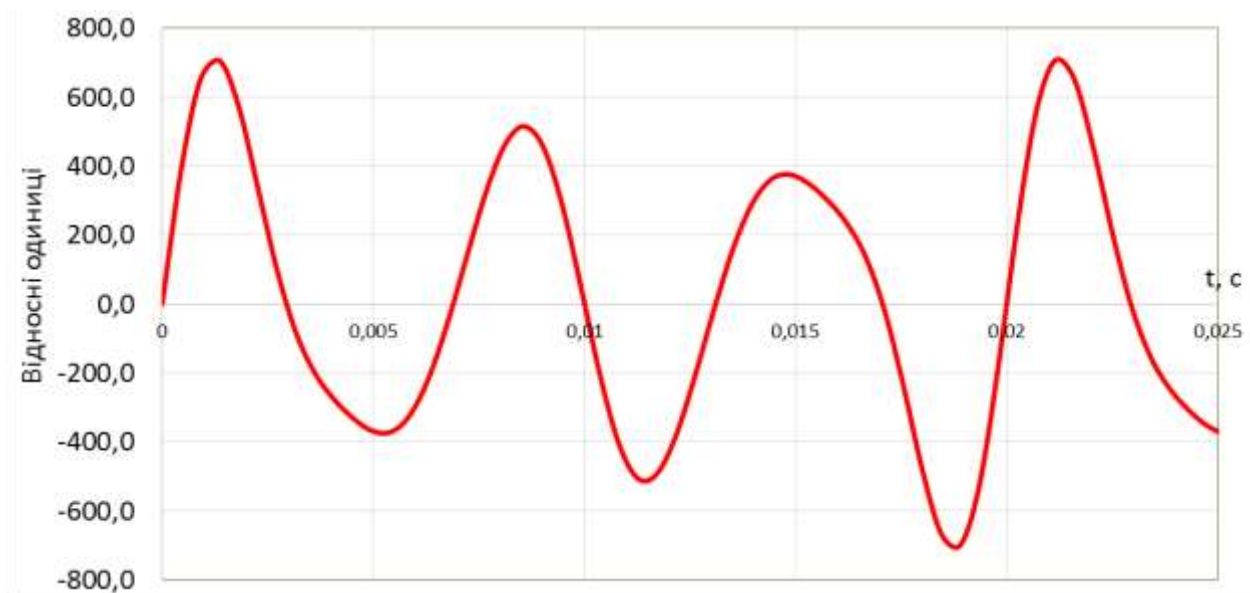


Рисунок 9 – Крива амплітудних значень акустичного сигналу відтворена за моделлю коронного розряду (розгорнуто до одного періоду)

Таким чином отримана математична модель акустичних коливань які створює коронний розряд, що дозволяє проводити моделювання коронного розряду за його акустичними шумами і дозволяє створювати прилади по визначенню наявності коронного розряду за його акустичним випроміненням.

Застосування моделі математичної залежності акустичного спектру дозволило створити метод розпізнавання наявності коронного розряду за спектральним характеристикам акустичного випромінення.

В загальному вигляді систему прийнято, як найпростішу модель реєстрації акустичних коливань (рис. 10). В якій враховується джерело і приймач за ідеальні.



Рисунок 10 – Найпростіша модель системи реєстрації акустичних коливань

На виході приймача отримуємо функцію випадкового сингала в залежності від часу $\xi(t)$. Випадковий процес $\xi(t)$, що залежить тільки від одного дійсного параметра t (часу) вважається визначеним на інтервалі часу $(0, T)$, якщо при довільному числі n для всіляких моментів часу t_1, t_2, \dots, t_n на цьому інтервалі відома n - мірна щільність розподілу ймовірностей $p_n(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n; t_1, t_2, \dots, t_n)$ або n - мірна характеристична функція

$$\Theta_n(jv_1, jv_2, \dots, jv_n; t_1, t_2, \dots, t_n) = M \left\{ \prod_{i=1}^n \exp(jv_i \xi_i) \right\}.$$

де $\xi_1 = \xi(t_1), \xi_2 = \xi(t_2), \dots, \xi_n = \xi(t_n)$.

Так як джерело акустичного сигналу живиться мережею промислової частоти, то прийнято, що акустичний сигнал, який вона буде створювати, також включає ще й гармонічну складову.

Розпізнавання наявності в акустичному сигналі сигналу від коронного розряду можна провести як вибір однієї із гіпотез.

H_0 – сигнал коронного розряду відсутній в акустичному сигналі

H_1 – сигнал коронного розряду присутній в акустичному сигналі

Де гіпотеза може бути вирахована порівнянням дисперсії із межовим найменшим значенням.

$$D = \min M |(F(x) - F_{kr}(x))^2|$$

де $F(x)$ – випадковий акустичний сигнал, який оброблено Фур'є перетворенням; $F_{kr}(x)$ – модель коронного розряду після Фур'є перетворення.

Прискорити розрахунок можна обмеживши частотний діапазон, на якому буде проводитися порівняння акустичних сигналів. За результатами експериментів визначено, що основні гармонічні сплески від коронного розряду припадають на перші сім гармонік 50 Гц; 100 Гц; 150 Гц; 200 Гц; 250 Гц; 300 Гц; 350 Гц. Всі інші мають величини, що різко спадають і їх можна не приймати до розрахунку.

Розроблений метод визначення наявності коронного розряду можна описати алгоритмом розпізнавання коронного розряду за акустичними коливаннями. Критерієм визначення наявності коронного розряду є виявлення певних спектральних ліній акустичного випромінювання, що належать до спектральних ліній коронного розряду, які описані моделлю. В алгоритмі (рис. 11) враховувалися і підготовчі дії і дії по збереженню результатів розпізнавання. Алгоритм пояснює втілення методу в апаратному вигляді. Порядок роботи алгоритму, зображеного на блок-схемі (рис. 11), наступний.

Після запуску процесу, мікрофон вловлює акустичні сигнали і передає їх в блок аналогових сигналів у вигляді електричних імпульсів. Аналоговий

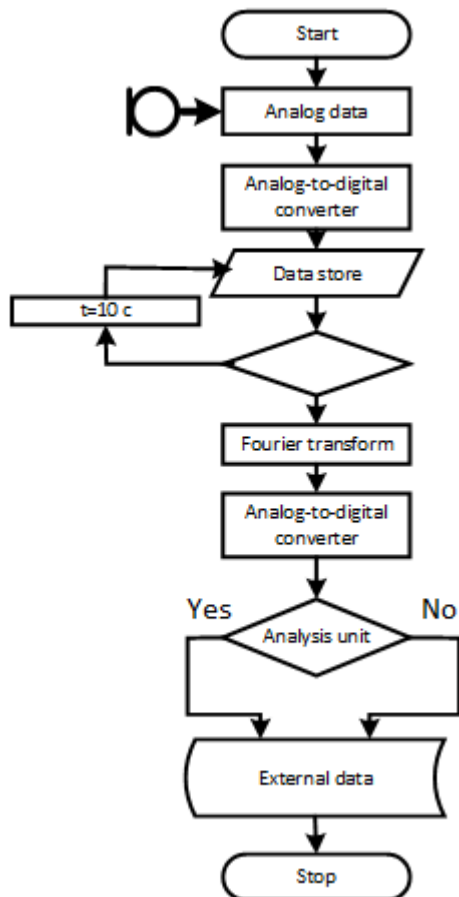


Рисунок 11 – Блок-схема розпізнавання наявності коронного розряду

сигнал обробляється на відсутність перевищень значень амплітуд і передається в блок аналого цифрової обробки. В блоці АЦП сигнал оцифровується і передається на запис в блок пам'яті. Запис акустичного сигналу виконується безперервно протягом всього часу роботи аналізуючого пристрою. З блоку пам'яті сигнал відбирається на блок порізки файлу на короткі фрагменти (наприклад довжиною 10 с).

В наступному блоці короткий файл розкладається за допомогою Фур'є перетворення. Де виділяються спектральні частотні складові акустичного сигналу. Результат Фур'є перетворення очищається від шумів і порівнюється із моделлю спектра коронного розряду. Аналізується на наявність

частотного спектру (основного 150-150-350 Гц) і вторинного (100-200-300 Гц). В разі співпадіння перевищення значень за обраними частотами сигналу над фоном, формується відповідний маркер синхронізований із таймером. Формується потік даних наявності коронного розряду, який направляється в зовнішню базу даних. Таким чином формується інформаційний потік, фіксації наявності коронного розряду.

Перевірка працездатності методу визначення наявності коронного розряду за акустичним спектром, була проведена на даних отриманих незалежно. Так для аналізу на наявність коронного розряду було взято два відеоролика з каналу YouTube [документальний фільм: *ФізматФільм Коронний розряд* <https://www.youtube.com/watch?v=oYRlxcpvBXs>] і [документальний фільм: *Коронний розряд* <https://www.youtube.com/watch?v=ddobPfJj11k>]

Обидва проведених аналізи підтвердили наявність спектральних ознак коронного розряду. Метод показав дієвість.

За розробленим методом було розроблено методику розпізнавання коронного розряду при наявності сторонніх акустичних шумів. Приведено класифікацію акустичних шумів за часовими характеристиками, за походженням. Описано вплив рівнів акустичних шумів. Проаналізовано характерні спектри акустичних шумів.

Для можливості використання методу при розробці приладів по визначенню наявності коронного розряду були розроблені методики для нерухомих і пересувних приладів.

Розроблено методику розпізнавання наявності коронного розряду нерухомим приладом, за допомогою обладнання з найпростішим технічним забезпеченням. Схематично комплект такого обладнання представлений на рисунку 12.

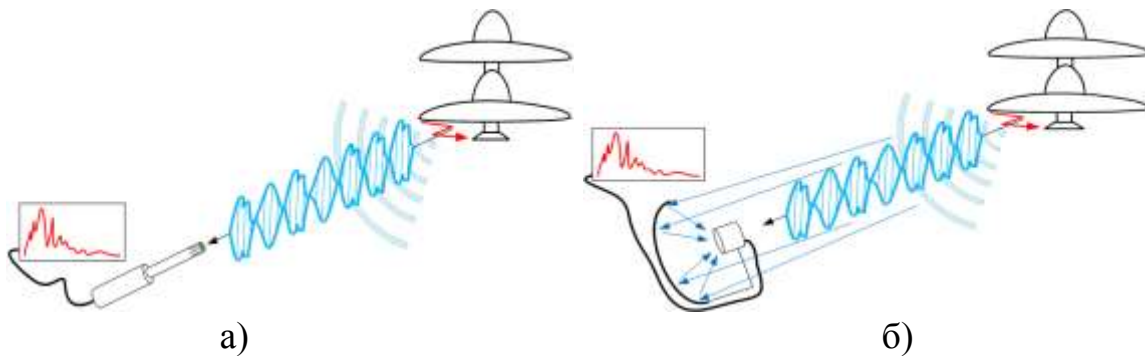


Рисунок 12 – Визначення наявності коронного розряду ручним приладом (а – акустичний мікрофон; б – акустичний мікрофон із концентратором акустичного випромінення)

Дальність дії такого комплекту приладів буде залежати від потужності акустичного джерела і потужності шумів. Тому вірогідність визначення залежить від відстані до коронного розряду. Якщо, в результаті замірів показник вірогідності наявності коронного розряду буде збільшуватися, то

напрям на коронний розряд знайдено. Підвищення дальності дії зазначеного комплекту приладів може бути збільшено за рахунок підвищення коефіцієнту підсилення підсилювача мікрофону, або за рахунок звуження кривої чутливості мікрофону (рис. 12 б).

Алгоритм програми розпізнавання буде наступним:

Крок 1 – механічний фільтр (відфільтрує вплив вітру на мікрофон);

Вітрозахист, призначений для усунення стороннього шуму, що виникає в трансляції звуку через повітряні маси що набігають на мікрофон.

Крок 2 – мікрофон вловить акустичні коливання і перетворить їх в АЦП на потік цифрових даних, придатних для подальшої обробки;

На виході мікрофона $x(t)$.

Крок 3 – перша черга фільтрів (цифрових) вилучить білий шум, нерегулярні сплески, і інші шуми

$$x(t) = f(t) + \xi(t).$$

де $f(t)$ – корисний сигнал; $\xi(t)$ – білий шум,

$$f(t) = x(t) - \xi(t).$$

Крок 4 – таймер розіб'є потік аудіо даних на фрагменти довжиною 10 секунд

$$f(t) = \sum_{i=1}^N f(t_i - t_{i-1}) = \sum_{i=1}^N f_{i\Delta t}(t)$$

де $\Delta t = const$ – часовий інтервал для аудіо фрагментів, ($\Delta t = const$); $f_{i\Delta t}$ – значення функції для відрізка часу Δt .

Крок 5 – для фрагменту буде проведене перетворення Фур'є

$$F(j\omega) = \int_0^{\infty} f_{i\Delta t}(t) dt$$

Крок 6 – результат перетворення Фур'є буде профільтровано набором вузькополосних лінійчатих фільтрів;

$$M(\omega) = \begin{cases} \forall \omega; F_2(j\omega_2) \in R \text{ при } 90 \cdot 2\pi \leq \omega_2 \leq 110 \cdot 2\pi \\ \forall \omega; F_3(j\omega_3) \in R \text{ при } 140 \cdot 2\pi \leq \omega_3 \leq 260 \cdot 2\pi \\ \forall \omega; F_4(j\omega_4) \in R \text{ при } 190 \cdot 2\pi \leq \omega_4 \leq 210 \cdot 2\pi \\ \forall \omega; F_5(j\omega_5) \in R \text{ при } 240 \cdot 2\pi \leq \omega_5 \leq 260 \cdot 2\pi \\ \forall \omega; F_6(j\omega_6) \in R \text{ при } 290 \cdot 2\pi \leq \omega_6 \leq 310 \cdot 2\pi \\ \forall \omega; F_7(j\omega_7) \in R \text{ при } 340 \cdot 2\pi \leq \omega_7 \leq 360 \cdot 2\pi \end{cases}$$

Розглядаються тільки ті, що існують на заданих діапазонах частот. Ширина кожної смуги становить 20 Гц

Крок 7 – результат після фільтра перевіряється на відповідність максимальному значенню заданим частотам;

Значення відношення максимального до середнього значення

$$A_k = \left. \begin{matrix} n \\ k = 2 \end{matrix} \right| \frac{F_{k,max}(j\omega_k)}{\overline{F_k}(j\omega_k)}$$

де A_k – значення величин функції перетворення Фур'є її відношення максимального до середнього на k -ому проміжку

$$S_k = A_k \text{ при } \left. \begin{matrix} n \\ k = 2 \end{matrix} \right| A_k \geq M_k \text{ інакше } S_k = 0$$

Перевірка на умову наявності максимального значення A_k на k -й полосі, яке перевищуватиме задане моделлю значення M_k . Якщо умова виконується для всіх k , то в спектрі висока ймовірність присутності спектру коронного розряду (можна визначити таку ймовірність як 60-80%). Якщо умова виконується для всіх k (3; 5; 7) ймовірність присутності спектру коронного розряду можна визначити як 50-70%. Якщо умова виконується для всіх k (2; 4; 6) ймовірність присутності спектру коронного розряду можна визначити як 40-60%.

Таку вимогу можна визначити як необхідну умову

Крок 8 – максимальні значення перевіряються на відповідність масці співвідношень амплітуд за частотами.

Перевірка відношення A_k між собою дасть відповідь на питання розвинутості коронного розряду

Якщо виконується умова

$$\frac{A_3}{A_5} \approx \frac{A_5}{A_7} \approx 2$$

Або виконується умова

$$\frac{A_2}{A_4} \approx \frac{A_4}{A_6} \approx 1$$

То ймовірність присутності спектру коронного розряду можна визначити як близьку до одиниці.

Розробка методики розпізнавання наявності коронного розряду при використанні пересувної платформи для системи розпізнавання. Пропонується, використовувати, в якості пересувної платформи, безпілотні літальні апарати (БПЛА). БПЛА можуть швидко пересуватися на місцевості і наближуватися до енергетичних об'єктів на відстані, достатні для проведення діагностичних дій.

На даний момент, є дві основні конструкції БПЛА: літакового типу і вертолітного (квадрокоптери). Кожна конструкція має свої недоліки і переваги. Порівняння характеристик безпілотних апаратів різних конструкцій: літакового і квадрокоптерного представлено на векторній діаграмі рис. 13.

Під час роботи, двигуни і гвинти БПЛА, створюють акустичні коливання, які можуть перешкодити виконанню роботи акустичним приладам. Для визначення можливості використання БПЛА було розглянуто квадрокоптер DJI Mavic Pro (Da-Jiang Innovations Science and Technology Co., Китай). Для даного квадрокоптера були записані звукові файли із різними режимами роботи. Режим злітання, зависання і польоту. Ці основні режими пілотування квадрокоптеру необхідні при проведенні діагностики системи електропостачання.

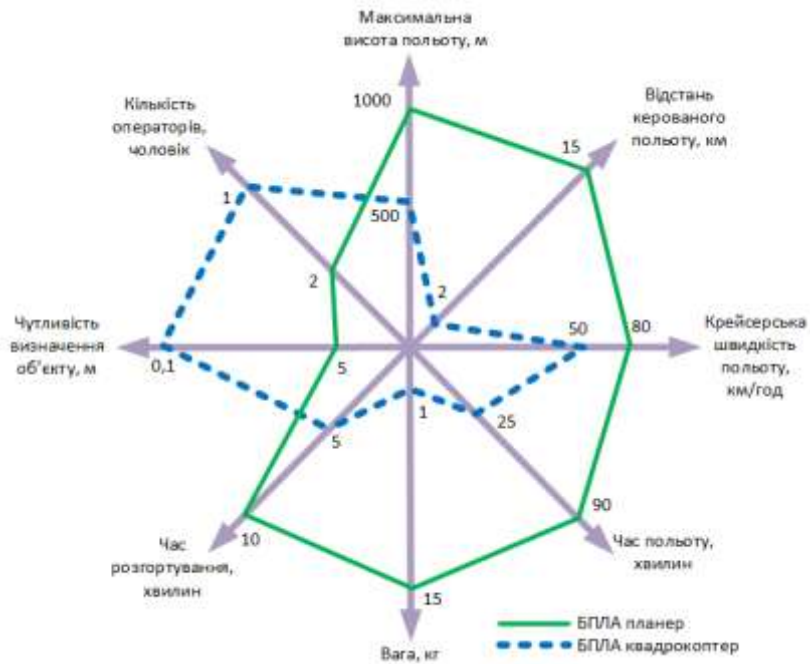


Рисунок 13 – Порівняння характеристик безпілотних апаратів різних конструкцій: літакового і квадрокоптерного

Фрагменти акустичних файлів режимів пілотування квадрокоптера представлені на рис. 14 .

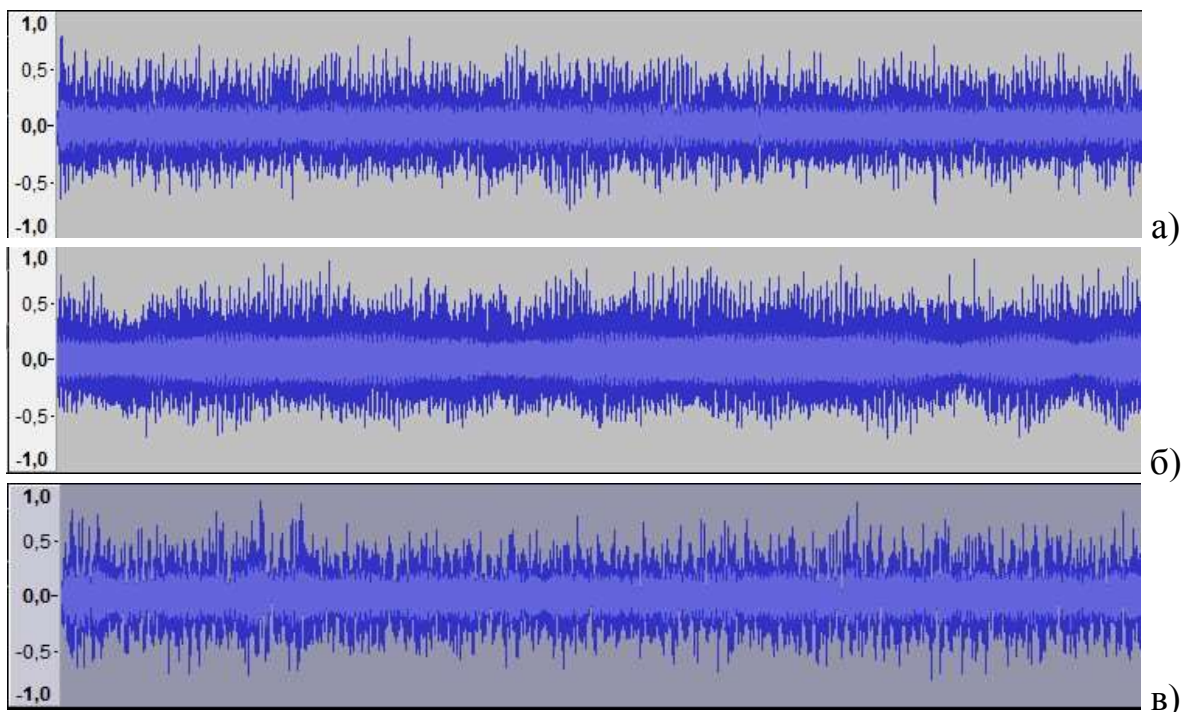


Рисунок 14 – Фрагмент акустичного файлу квадрокоптера DJI Mavic Pro режим (а – злітання; б – зависання; в – політ)

Кожний із зазначених аудіо файлів було проаналізовано на складові акустичного спектру. Спектральні криві наведено на одному графіку із з

спектром коронного розряду. Очевидно, що під час польоту квадрокоптеру, коронний розряд можна визначити тільки за деякими піками (рис. 15)

Можна побачити, що для деяких режимів пілотування квадрокоптера, акустичний шум двигунів не перекриває спектральні піки коронного розряду.

Під час зміни режиму пілотування з польоту на зависання, спектр квадрокоптера змінюється і в такому разі можна визначити більшу кількість спектральних піків коронного розряду (рис. 16)

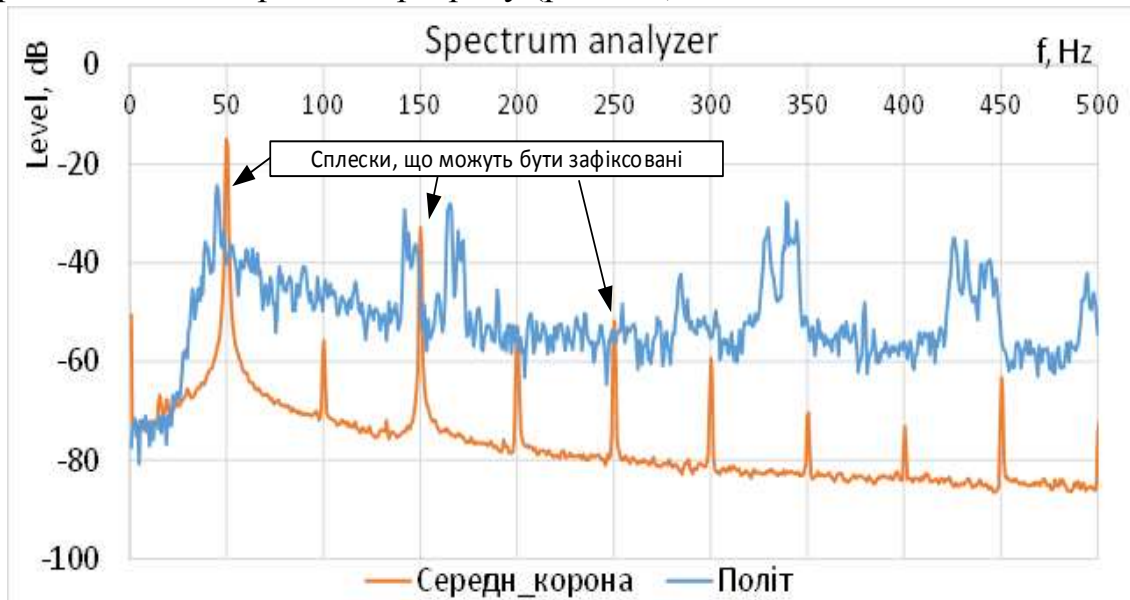


Рисунок 15 – Спектральні піки коронного розряду і спектр квадрокоптера під час польоту

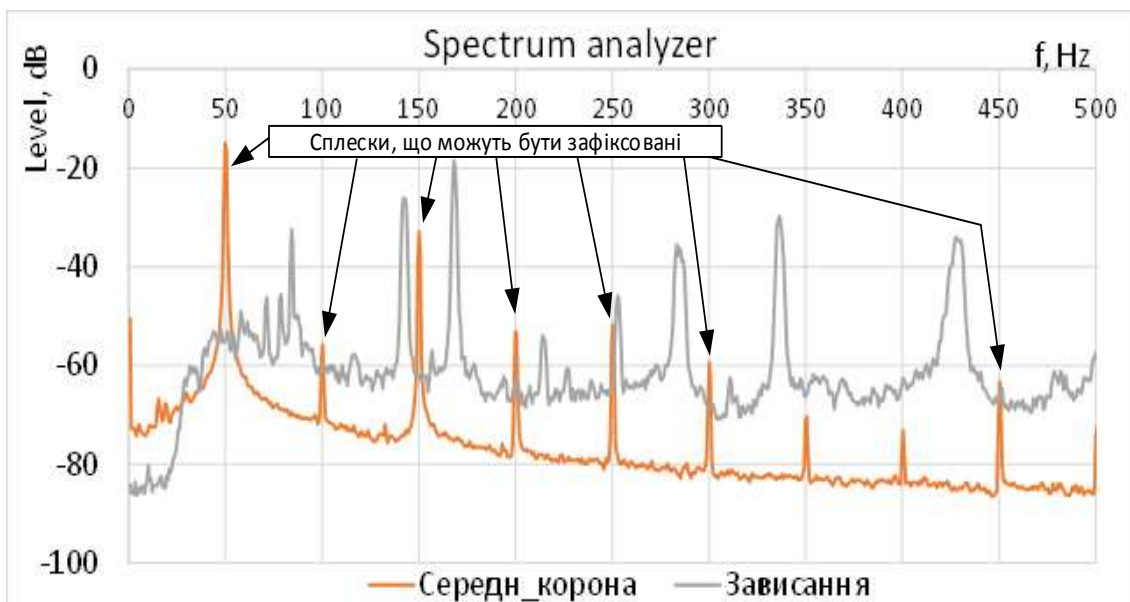


Рисунок 16 – Спектральні піки коронного розряду і спектр квадрокоптера під час зависання

Для перевірки можливості використання моделей квадрокоптерів інших виробників було обрано випадковий відео ролик з YouTube з польотом

квадрокоптера. Звукову доріжку якого і було проаналізовано. Результати спектрального аналізу показали можливість використання БПЛА в якості платформи для розташування акустичної розпізнавальної системи. Але порядок визначення наявності коронного розряду буде включати зміну режиму польоту. Так під час польоту, визначити коронний розряд можна тільки по двох спектральних складових 150 Гц і 250 Гц. Таке визначення наявності має невелику точність, тому при появі таких сигналів-маркерів на визначених частотах квадрокоптер має перейти в режим зависання і перевірити наявність піків на частотах 100, 150, 200, 250, 300 Гц і наприклад 450 Гц. Наявність піків на даних частотах сигналізує про наявність коронного розряду.

В розділі показано переваги методу акустичного виявлення наявності коронного розряду – це можливість дистанційно визначити наявності коронного розряду без контакту із струмоведучими частинами, навіть поза прямої видимості, із мінімальним впливом сторонніх факторів, таких як, погодні умови, години доби і інші.

Таким чином розроблений метод, по виявленню наявності коронного розряду за спектральним характеристикам акустичного випромінення відповідає меті і завданню даної роботи.

Питання наявності коронного розряду, вирішене в даному розділі, ставить наступне завдання, а саме визначення координат коронного розряду.

У четвертому розділі розглядається питання визначення координат коронного розряду за його акустичним випроміненням. Наведено теоретичні основи розрахунку тривимірного поля тиску звукової хвилі. На властивостях поля звукової хвилі проведено розрахунок поля тиску звукової хвилі коронного розряду у тривимірному просторі. Для цього було прийнято криві сили звуку ізолятора (рис. 17) і криві сили звуку провода (рис. 18).

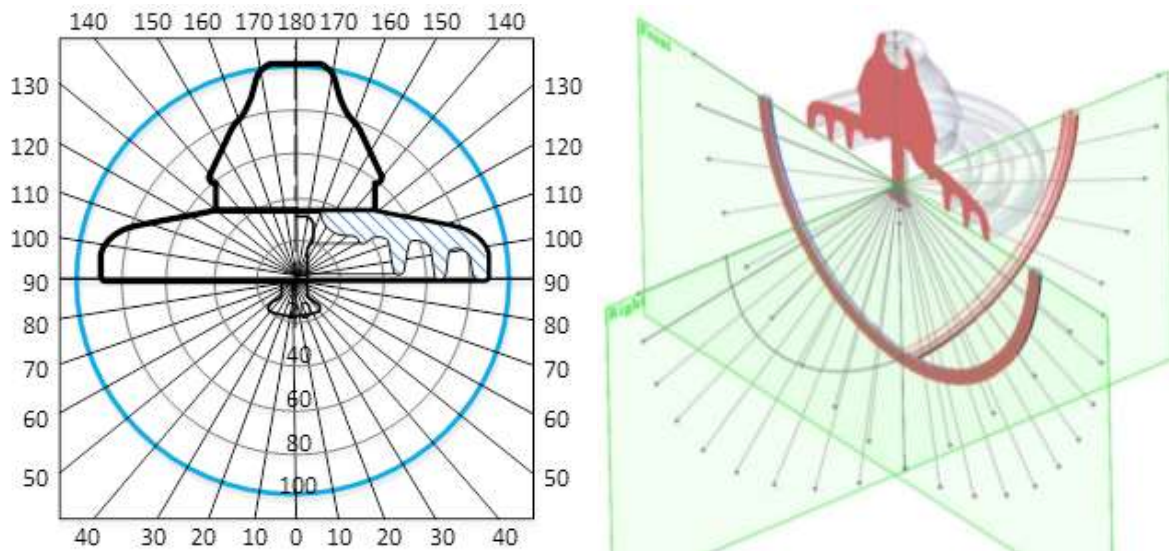


Рисунок 17 – Крива сила звуку від корони на ізоляторі

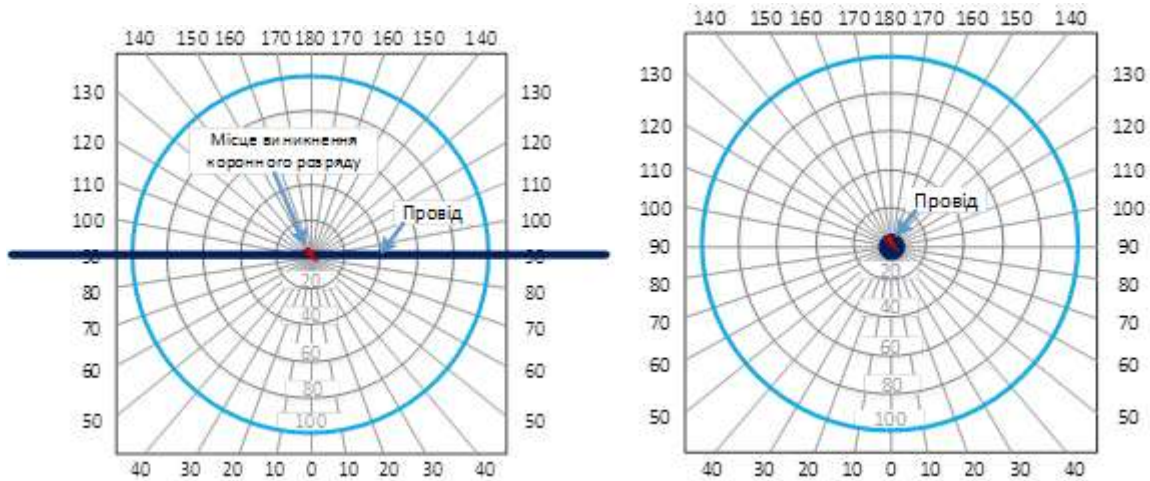


Рисунок 18 – Крива сила звуку від корони на проводі

Розраховано ізолінії звукового поля еквівалентних джерел коронного розряду. Побудоване звукове поле для різних гармонічних складових (50; 150; 250 Гц).

Для випадку коли коронний розряд виникає одночасно в декількох місцях струмопровідного обладнання, розглядали джерело акустичного сигналу від коронних розрядів, як одночасне в просторі від багатьох точкових джерел.

Для розрахунку рівнів тиску звукового поля було прийнято прямокутний простір, в центрі якого розташовано джерело акустичного випромінювання (рис. 19).

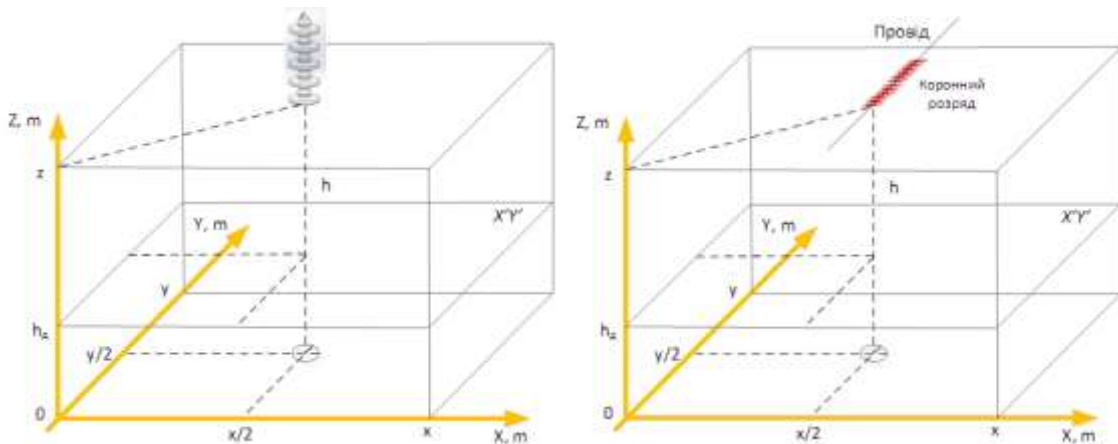


Рисунок 19 – Простір для розрахунку звукового поля від джерела з коронним розрядом (гірлянда ізоляторів – ліворуч; провід – праворуч)

За формами звукового поля було розроблено методику визначення координат коронного розряду, як джерела звуку. Визначення ізоліній тиску звукового поля проводили для енергетичного і інтерференційного розрахунків. Виходячи із ізоліній поля тиску звукової хвилі визначають розташування джерела акустичного поля. Пошук координат проведено по визначенню

найбільшого зростання градієнта звукового тиску. Це дозволило створити методику по знаходженню координат джерела коронного розряду і пристосувати її для діагностичних приладів

Ускладнення методики пошуку координат коронного розряду визначається вимогою використання автоматичних скануючих систем. Були запропоновані методики пошуку координат коронного розряду нерухомим скануючим приладом і рухомим скануючим приладом.

Варіант нерухомого скануючого прилада. Методика пошуку напрямку максимального значення амплітуди, або напрямку на джерело акустичного сигналу виконане наступним чином. Для скануючого приладу кругової спрямованості, в якому мікрофон оббігає 360° оточуючого простору (рис. 20)

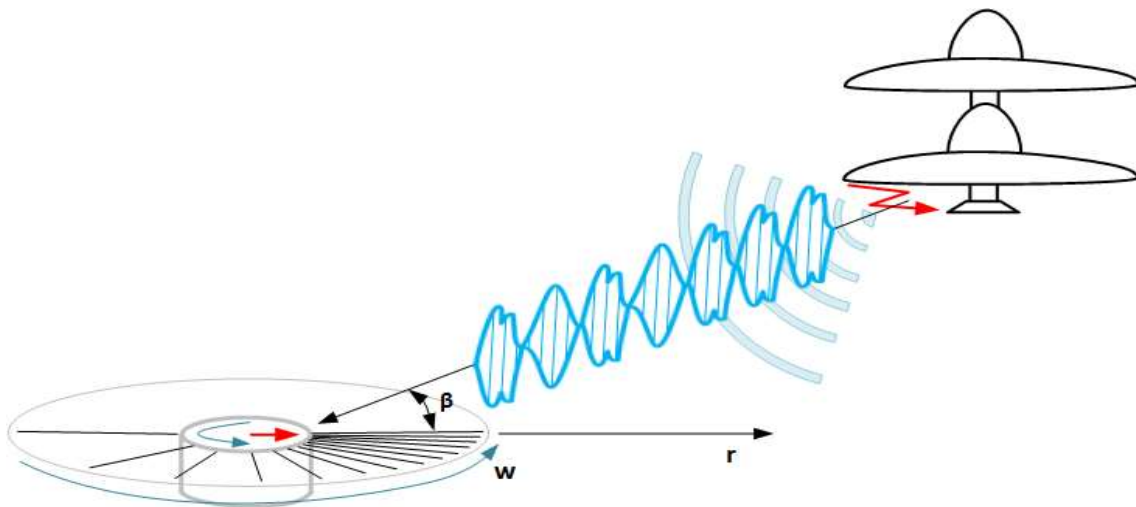


Рисунок 20 – Скануючий прилад із круговою діаграмою сканування

На виході мікрофона отримуємо сигнал, максимальне значення якого буде залежати від кута повороту β . На рис. 21 показані криві чутливості мікрофонів.

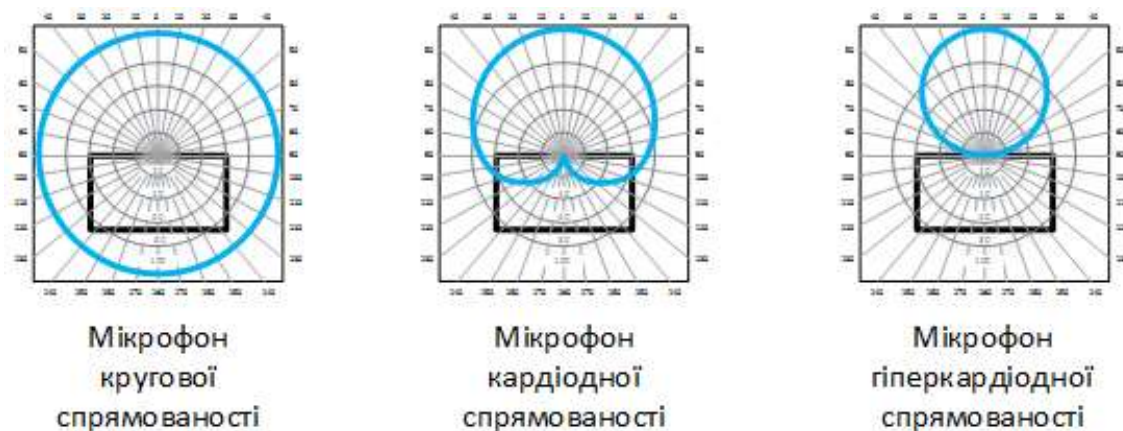


Рисунок 21 – Криві чутливості мікрофонів

При випадковій амплітуді сигналу, максимальне значення може не співпадати із напрямом на джерело. В такому разі виконується пошук математичного очікування для отриманої функції на мікрофоні. Формула визначення напрямку на джерело акустичного сигналу з урахуванням діаграми чутливості мікрофона буде мати вигляд:

$$M_{M\beta} = \int_0^{2\pi} \beta \cdot f_M(\beta) \cdot f(t_\beta) d\beta$$

де $f_M(\beta)$ – функція чутливості мікрофона в залежності від кута повороту мікрофона в просторі на кут β ; $f(t_\beta)$ – функція інтенсивності випромінювання джерела в залежності від часу за який виконується поворот мікрофону в просторі на кут β ; β – кут повороту мікрофона.

В якості рухомої платформи для скануючої системи запропоновано БПЛА.

Варіант рухомої платформи для скануючої системи. В якості рухомої платформи запропоновано БПЛА. Відповідно до цього і розроблені алгоритми пошуку координат джерела акустичного сигналу і як наслідок координати коронного розряду. На рис. 22 надане схематичне зображення до розрахунку місця розташування коронного розряду за допомогою БПЛА.

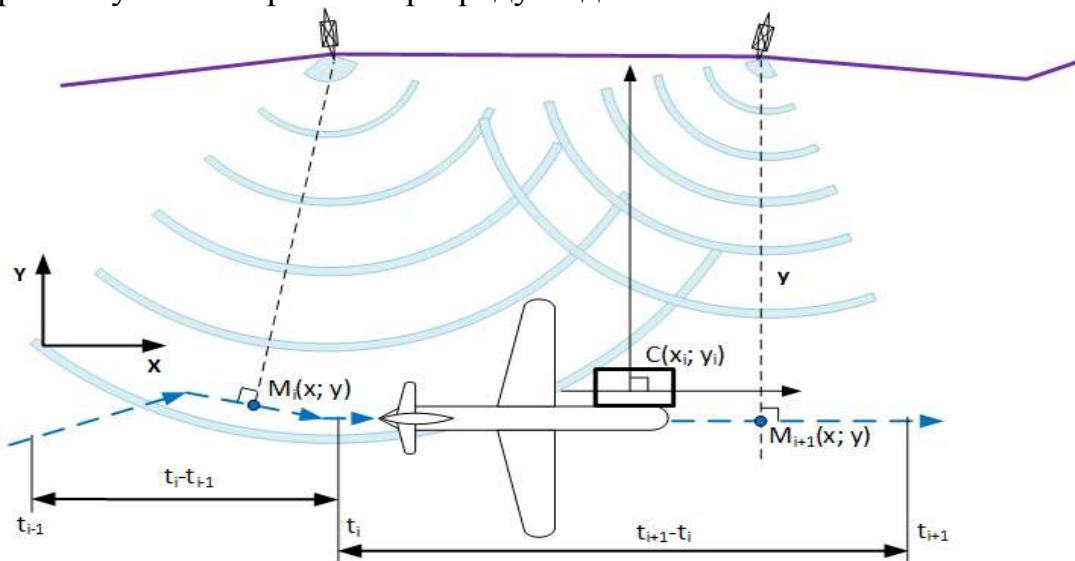


Рисунок 22 – Визначення місця розташування коронного розряду за допомогою БПЛА

Координати БПЛА відомі в кожний момент часу, з даних що передають пеленгом GPS. Координати лінії електропередач відомі із геоінформаційної системи (проставлені на карті). Тоді поточні координати до джерела можна буде визначити за математичним очікуванням

$$M_M = \int_{t_{i-1}}^{t_i} t \cdot f_M(t) \cdot s(t) dt$$

де $f_M(t)$ – функція чутливості акустичного приймача; $s(t)$ – функція інтенсивності звуку.

При визначенні математичного очікування, за визначеним часом встановлюються координати БПЛА і вираховуються спільне рішення від нормалі руху БПЛА до перетину із координатами лінії електропередач.

Враховано вплив перешкод, екрануючих акустичні випромінювання.

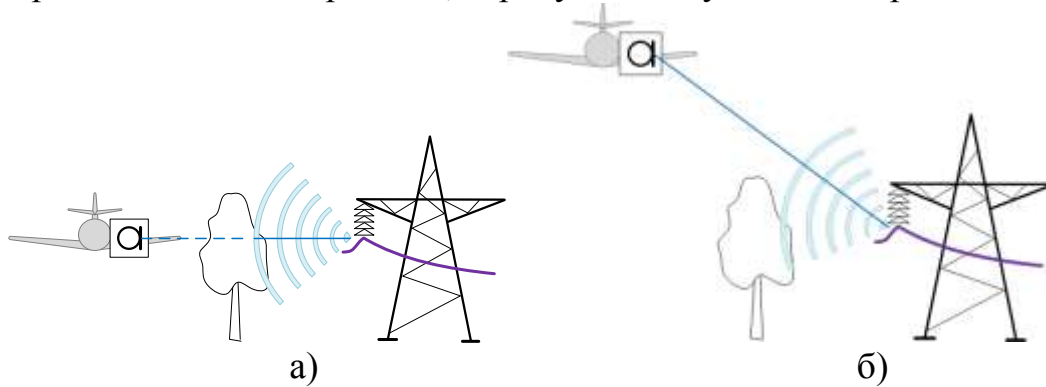


Рисунок 23 – Вплив перешкод екрануючих акустичні випромінювання: а – екранування акустичного випромінювання; б – зона гарантованого сприйняття акустичного сигналу

При використанні БПЛА, як носія скануючого обладнання, в наслідок високих швидкостей, можливий вплив ефекта Доплера на акустичні вимірювання. Якщо приймач рухається назустріч хвилям, ефект Доплера:

$$\omega = \omega_0 \left(1 + \frac{u}{c}\right)$$

де u – швидкість приймача щодо середовища (позитивна, якщо він рухається у напрямку до джерела); ω_0 – кутова частота, з якою джерело випускає хвилі; c – швидкість поширення хвиль в середовищі.

Відповідно до зазначеного ефекту частота звукового випромінювання коронного розряду яку зареєструє приймач має наступну залежність (рис. 24) від швидкості БПЛА, розглядається випадок наближення приймача до джерела.

В методиці пошуку джерела коронного розряду з урахуванням швидкості скануючого обладнання по відношенню до нерухомого акустичного джерела враховано вплив ефекту Доплера. Відповідно до впливу ефекту Доплера, результуюча модель акустичного випромінювання коронного розряду прийме вигляд

$$f(t) = A_0 + \sum_{i=2}^7 A_{mi} \sin \left(2\pi \cdot i \cdot f_i \cdot \left(1 + \frac{u}{c}\right) \cdot t + \varphi_i \right)$$

де A_0 – акустичні фонові шуми; f_i – частота відповідної i -ї гармоніки; $A_{m2} \dots A_{m7}$ – амплітуди з 2-ої по 7-му гармонічну складову; $\varphi_2 \dots \varphi_7$ – зсув фази з 2-ої по 7-му гармонічну складову; u – швидкість приймача щодо середовища (позитивна, якщо він рухається у напрямку до джерела).

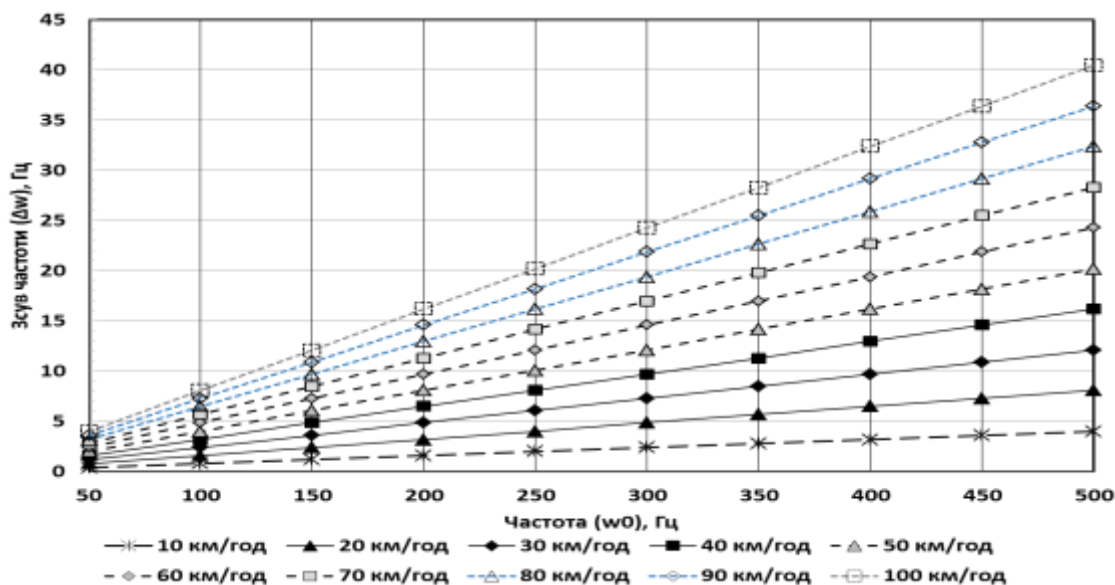


Рисунок 24 – Залежність зсуву частоти джерела відповідно до швидкості приймача що рухається у напрямку джерела.

Таким чином, розроблений метод пошуку координат коронного розряду за акустичним випроміненням повністю відповідає меті і задачам поставленим в роботі.

У п'ятому розділі розглядаються питання перспективи розвитку метода визначення наявності коронного розряду за спектро-акустичним випроміненням. В попередніх розділах при проведенні спектрального аналізу за спектрально акустичним методом виявлення коронного розряду були виявлені недоліки перетворення Фур'є. З огляду літератури наведено перелік недоліків методів Фур'є перетворень для проведення спектрального аналізу.

Для використання більш відповідного математичного метода проведено огляд літератури по математичним методам. Проведено огляд математичних моделей і методів для моніторингу властивостей динамічних процесів. Описані завдання моніторингу динамічних процесів. При відповідному припущенні, що акустичні шуми від коронного розряду представлятимемо як часовий ряд, то в літературі пропонується певна кількість методів аналізу часових рядів. Проведено аналіз структури часових рядів для виявлення причинно-наслідкових зв'язків динамічної системи. Виявлені моменти зміни властивостей часового ряду. Виявлені моменти виходу окремих параметрів процесу за допустиму область значень. Визначені оптимізація регулювання і контроль якості. Запропоновано використовувати метод сингулярно - спектрального аналізу (SSA - Singular Spectrum Analysis). Він використовується для дослідження структури часових рядів. Метод SSA заснований на виділенні головних компонент аналізованого часового ряду. Ідея методу SSA полягає в перетворенні одновимірного часового ряду в матрицю, дослідженні її за допомогою аналізу головних компонент (сингулярного розкладання) і

відновленні (апроксимації) ряду по вибраних головних компонентах. Метою методу SSA є розкладання часового ряду на адитивні складові, що допускають змістовну інтерпретацію. У основі методу лежить сингулярне розкладання траєкторної матриці, стовпцями якої є фрагменти довжини L досліджуваного часового ряду (тобто вектору вкладення), де L - основний параметр методу ("довжина вікна"). Аналіз членів сингулярного розкладання дозволяє спочатку класифікувати їх як що відносяться до однієї з компонент ряду, а потім виділити цю компоненту.

Таким чином, для подальшого розвитку методу визначення наявності коронного розряду пропонується використовувати представлення акустичних замірів в якості часового ряду, і використовувати для його розкладання метод SSA, результатом застосування якого є розкладання часового ряду на прості компоненти: тренд, періодичні складові, шум. Що дозволить усунути недоліки методів Фур'є перетворень.

У шостому розділі розглядається питання використання методу діагностики якості електропостачання з діагностичними приладами встановленими на безпілотному літальному апараті.

Для проведення оцінки і економічних розрахунків, при використанні розроблених методів (описаних в розділі 3 і розділі 4), проведено огляд стану електропостачання в Україні. Зазначено що обладнання має значний знос, показана залежність надійності обладнання від його зносу. Проведено розрахунок втрат від аварійних режимів. Розроблені пропозиції заходів по зменшенню втрат від аварійних режимів за рахунок використання БПЛА

Виходячи з того, що якісні параметри електропостачання не занесені в нормативні документи, і на даний час тільки розробляються, то обрано одну характеристику обладнання – надійність. Показана залежність надійності обладнання від його зносу.

Імовірність безвідмовної роботи - це ймовірність того, що виріб не відмовить протягом заданого проміжку часу t в заданих умовах експлуатації.

Імовірність безвідмовної роботи виражається через щільність ймовірності $f(t)$ у такий спосіб

$$\text{Над}(t) = \int_e^{\infty} f(t)dt$$

Подія протилежна ймовірності безвідмовної роботи називається ймовірністю відмови протягом заданого проміжку часу t в заданих умовах експлуатації

$$\text{Авар}(t) = \int_{-\infty}^t f(t)dt$$

Ймовірності відмови і безвідмовної роботи – повна група подій

$$\text{Над}(t)+\text{Авар}(t)=1.$$

Вірогідність відмови обладнання за проміжок часу t ,

$$\text{Авар}(t) = \int_{-\infty}^t f(t)dt = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \sigma \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(t_i-t_{cp})^2}{2\sigma^2}} \cdot dt$$

На рис. 25 показан графік відмов який обмежено межею аварійності із сіткою періодичності оглядів.

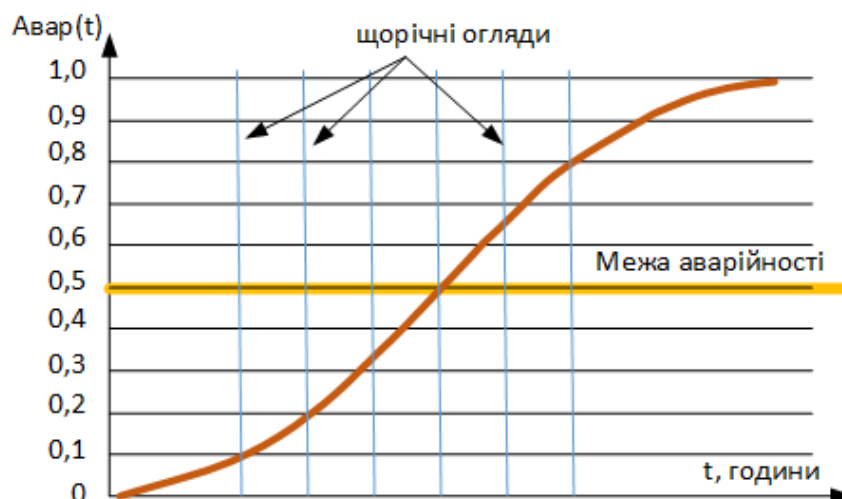


Рисунок 25 – Графік відмов обладнання і періодичні огляди на обладнанні із значним зносом

Запропоновано підвищення надійності за рахунок збільшення оглядів і збільшення збору обсягу інформації під час огляду, що досягається за рахунок виконання поверхових оглядів технічними засобами БПЛА. Пропонується проводити огляди і діагностику з використанням діагностичного обладнання дистанційної дії. До таких методів належить розроблений метод діагностики наявності коронного розряду по спектру акустичного випромінення.

Проведено розрахунок економічного ефекту від впровадження використання БПЛА, який включав визначення дохідної частини від впровадження заходу, визначення збитку енергокомпанії від недоотриманого прибутку, визначення повних збитків, визначення витрат на придбання і на поточні витрати підтримання комплектів БПЛА, та визначено ефективність впровадженого заходу. Показана висока економічна ефективність запропонованого методу оглядів за допомогою БПЛА.

У додатках наведено Результати замірів якості електричної енергії на підстанціях 35-220 кВ; Лістинг програми побудови акустичного спектру коронного розряду в MathLab; Аналіз звукових доріжок сторонніх джерел на виявлення спектру коронного розряду; Аналіз звукової доріжки відео файлу польоту квадрокоптера; Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі сформульовано та розв'язано актуальну для теорії і практики електропостачання наукову проблему покращення якості електропостачання. Ця проблема полягає в урахуванні впливу на якісні показники системи електропостачання такого погіршуючого фактора, як коронний розряд.

Основні результати проведених досліджень полягають в наступному:

1 Розглянуто основні параметри якості електропостачання і фактори, які впливають на якість електропостачання:

– показані основні параметри якості електропостачання, які було згруповано по різним чинникам, які охоплюють джерела електричної енергії, електричну мережу, споживача. Звернута увагу на те, що якість електричної енергії, можна розглянути як один з елементів якісних показників електропостачання;

– проведено заміри якості електричної енергії на реальних об'єктах енергетичного комплексу України. Показана наявність відхилень параметрів якості електричної енергії;

– визначені різні чинники, що впливають на показники якості електропостачання. Увагу було зосереджено на найпоширеніше явище – коронний розряд, який приймає участь в погіршенні показників якості електропостачання. Визначені показники якості електропостачання, на які чутливо впливає коронний розряд;

– розглянуто коронний розряд, як наймасове явище, що супроводжує роботу електричних комплексів. Показано, що коронний розряд призводить не тільки до не зворотних втрат електричної енергії але й, перешкоджає передаванню високочастотних сигналів, погіршує ізоляційні елементи, може стати джерелом умов для виникнення дугового розряду і є одним із чинників зміни безперервності.

2 Розроблена математична модель акустичної спектральної функції коронного розряду:

– показані процеси в коронному розряді, які приводять до виникнення акустичних коливань. До них віднесено іонний струм і струму зміщення в зовнішній зоні коронного розряду;

– проведено експериментальне дослідження взаємозв'язку коронного розряду і акустичного випромінення. Дослідження підтвердили наявність зв'язку акустики і коронного розряду;

– за результатами обробки спектральної функції, за зворотнім перетворенням Фур'є, побудовано модель акустичного випромінення коронного розряду.

3 Розроблено метод визначення наявності коронного розряду за спектром акустичного випромінення:

– розроблено метод, по виявленню наявності коронного розряду за спектральними характеристиками акустичного випромінення;

– за розробленим методом було розроблено методику розпізнавання коронного розряду при наявності сторонніх акустичних шумів;

– для можливості використання методу при розробці приладів по визначенню наявності коронного розряду була розроблена методики для нерухомих і пересувних приладів;

– показано переваги методу виявлення наявності коронного розряду за акустичним спектром, це можливість визначення наявності коронного розряду дистанційно, навіть поза прямої видимості, не зважаючи на час доби і не зважаючи на пору року.

4 Розроблено метод пошуку координат коронного розряду, як джерела звуку:

– розраховано ізолінії звукового поля еквівалентних джерел коронного розряду. Побудоване звукове поле для різних гармонічних складових.

– розроблено метод по знаходженню координат джерела коронного розряду, що визначається із ізоліній поля тиску звукової хвилі від джерела акустичного поля;

– запропоновані методики пошуку координат коронного розряду нерухомим скануючим приладом і рухомим скануючим приладом. В методиках враховано вплив перешкод, екрануючих акустичні випромінювання. В якості рухомої платформи для скануючої системи запропоновано БПЛА, для яких враховано вплив ефекта Доплера на акустичні вимірювання.

5 Розроблено критерії, що дозволяють виявити зміну безперебійності електроенергетичної системи через частоту оглядів за участі безпілотних літальних апаратів.

6 Проведено експериментальну перевірку розроблених методів і оцінок.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Сокол Є.І., Резинкіна М.М., Гриб О.Г., Сендерович Г.А., Карпалюк І.Т., Скопенко В.В., Грабко В.В., Запорожець А.О., Фурсова А.В., Томашевський Р.С., Васильченко В.І., Швець С.В. Використання безпілотників для підвищення безпеки та ефективності енергетичної системи; монографія : Харків : ФОП Бровін О.В., 2020. 148 с.

Здобувачем досліджені сучасні методи вимірювань параметрів енергетичної системи за допомогою безпілотників

2 Сокол Є.І., Резинкіна М.М., Гриб О.Г., Сендерович Г.А., Карпалюк І.Т., Скопенко В.В., Грабко В.В., Запорожець А.О., Синельников О.Є., Томашевський Р.С., Старенький В.П., Васильченко В.І., Швець С.В., Захаренко Т.С. Економічна ефективність моніторинга ліній електропередач безпілотними літальними апаратами; монографія : Харків : ФОП Бровін О.В., 2020. 140 с.

Здобувачем розроблено розділ підвищення надійності енергетичної системи через кількість оглядів

2. Абракитов В.Е., Карпалюк І.Т. Глобальная теория, объясняющая процессы снижения шума при переходе звуковой волны границы раздела сред //

Коммунальное хозяйство городов Научно-технический сборник Вып. 64, Киев : Техніка, 2005. С.63-70

Здобувачем проведений аналіз теоретичних засад розповсюдження акустичних звиль через тверді перешкоди

3. Карпалюк И.Т., Чернявская М.В., Классификация и выбор системы с вентильным двигателем для регулируемого электропривода // Коммунальное хозяйство городов научно-технический сборник. Выпуск №88 серия : технические науки; Киев : "Техніка", 2009. С. 211-218

Здобувачем виконано аналіз і класифікація виконавчих двигунів систем вентильних двигунів

4. Карпалюк И.Т., Чернявская М.В. Описание математической модели вентильного двигателя // Коммунальное хозяйство городов научно-технический сборник. Выпуск №95 серия : технические науки и архитектура; Киев : "Техніка", 2010. С. 133-137

Здобувачем виконано аналіз структури математичного моделювання вентильних двигунів

5. Капралюк І.Т., Чернявська М. В., Кузнецов А.І., Глебова М.Л. Моделирование тиристорного перетворювача вентильных двигунів // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХП" : зб. наук. пр. Темат. вип. : Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів : Харків : НТУ "ХП", 2010. № 36. С. 118-126.

Здобувачем виконано аналіз різних сполучень параметрів вентилів тиристорного перетворювача

6. Капралюк І.Т., Чернявська М. В., Кузнецов А.І., Глебова М.Л. Розрахунок додаткових витрат та пульсацій електромагнітного моменту вентильного двигуна змінного струму // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов : Харьков : НТУ "ХПИ", 2010. № 55. С. 121-125.

Здобувачем виконано аналіз втрат збудження і поверхневих втрат ротора від величини повітряного проміжку

7. Карпалюк И.Т., Чернявская М.В., Глебова М.Л. Определение относительной погрешности амплитуд высших временных гармоник токов вентильных двигателей постоянного тока // Комунальне господарство міст. Науч.-техн. сб. Вып. 101 Серия "Технические науки" : Київ : Техніка, 2011. С. 234-242. ISSN 0869-1231

Здобувачем виконано аналіз статистичних моделей по визначенню величини відносної похибки при заміні реальної форми кривої струму статора

8. Карпалюк И. Т., Карюк А.А. Потенциальное влияние использования облачных технологий на экономию электроэнергии на предприятиях с коммутацией и распределением энергии // Тези доповідей Регіональної науково-практичної конференції Менеджмент міського і регіонального розвитку, Харків, ХНАМГ, 2012. С. 140

Здобувачем проведено аналіз поступового переходу до хмарових технологій в електроенергетиці

9. Карпалюк И. Т., Карюк А. А. Анализ проблем связанных с согласованием потребителей и источников питания по основным показателям качества электрической энергии // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика : Харьков : НТУ "ХПИ". 2012. № 61 (967). С. 95-98.

Здобувачем виконано аналіз узгоджувачих пристроїв для узгодження споживачів в мережі низької напруги

10. Карпалюк И.Т., Чернявская М.В., Глебова М.Л. Анализ высших временных гармоник токов вентильных двигателей постоянного тока // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія : Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. Харків : НТУ «ХПІ». 2012. №61 (967). С. 35-43

Здобувачем виконано аналіз наявності статистичних моделей визначення рівня самих вищих часових гармонік для моделювання вентильних двигунів

11. Швець С.В., Гриб О.Г., Донецкая Т.С., Мариненко А.П., Карпалюк И.Т. Расчет мощности и потерь в трехфазной электрической сети // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія : Гідравлічні машини та гідроагрегати = Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series : Hydraulic machines and hydraulic units : зб. наук. пр./ Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т" : Харків : НТУ «ХПІ», 2018. №46 (1322). С. 60-66

Здобувачем виконано аналіз екстремумів функцій потужності і втрат

12. Карпалюк І. Т., Гриб О. Г., Швець С. В. Майбутнє сучасної енергетики - перехід до єдиного цифрового середовища енергетичних комплексів // II Всеукраїнська науково-технічна конференція «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2018)». Збірник наукових праць. Харків : «Друкарня Мадрид», 2018. С 41-43

Здобувачем проведено аналіз сучасного стану технологій електроенергетичного обладнання і надано висновки по тенденціям розвитку

13. Карпалюк И.Т., Кривонос В.Е., Василенко С.В., Срок службы изоляции при отклонениях напряжений и учете отклонений активных сопротивлений обмоток статора асинхронного двигателя //Збірник статей науково-інформаційного центру «Знання» за матеріалами LIII міжнародної науково-практичної конференції : «Розвиток науки в XXI столітті», Харків : науково-інформаційний центр «Знання», 2019. С. 57-65

Здобувачем зроблені висновки щодо можливих причин виникнення температур відхилів обмоток статора двигуна при відхилах живлячої напруги

14. Карпалюк І.Т., Гриб О.Г., Швець С.В., Рудевич Н.В. Элементы цифровой энергетики в контроле stanu мережі, що побудовані на вимірах допоміжних параметрів // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія : Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії =

Вестник Национального технического университета "ХПИ". Серия : Электрические машины и электромеханическое преобразование энергии = Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series : Electrical Machines and Electromechanical Energy Conversion : зб. наук. пр./ Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т" : Харків : НТУ «ХПІ», 2019. №20. С. 67-73

Здобувачем виконано аналіз методів контролю станів мережі на вимірах допоміжних параметрів

15. Карпалюк І. Т., Гриб О. Г., Захаренко Н. С., Рудевіч Н. В., Швець С. В. Моніторинг показників якості акустичним методом // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія : Енергетика : надійність та енергоефективність : зб. наук. пр./ Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т" : Харків : НТУ «ХПІ», 2019. №29. С. 47-51

Здобувачем проведено аналіз акустичних коливань від коронного розряду на струмопровідних частинах електроустановки

16. Карпалюк І.Т., Гриб О.Г., Швець С.В., Рудевіч Н.В., Захаренко Н.С. Акустичні методи діагностики коронного розряду в лініях електропередач // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка Технічні науки. Випуск 203 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» : Харків : ХНТУСГ, 2019. С. 12-15

Здобувачем виконано аналіз методу акустичного контролю наявності коронного розряду в лініях електропередач

17. Карпалюк І.Т., Гриб О.Г., Швець С.В., Рудевіч Н.В., Захаренко Н.С. Моніторинг якості в електричній мережі за умови цифрової енергетики // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка Технічні науки. Випуск 204 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» : Харків : ХНТУСГ, 2019. С. 3-5

Здобувачем виконано аналіз спектроакустичного контролю стану електричного обладнання по наявності коронного розряду

18. Карпалюк І. Т., Гриб О. Г., Швець С. В. Прогнози показателів якості електричної енергії // Інформаційні технології : наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : тези доповідей ХХVІІ міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2019 : Харків : НТУ «ХПІ». С 144.

Здобувачем проведено аналіз вимог для якісних параметрів електричної енергії

19. Карпалюк І. Т., Гриб О. Г., Дем'яненко Р. І., Виявлення акустичних характеристик коронного розряду // ІІІ Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (ЕЕЕС-2019)». Збірник наукових праць. Харків : «Друкарня Мадрид», 2019. С 75

Здобувачем запропоновано напрям використання акустичних вимірювань параметрів коронного розряду

20. Krivonosov V., Vasilenko S., Karpaliuk I. Influences of the imbalance of the active resistances of the stator windings on the asymmetry of phase currents in conditions of poor-quality network voltage // Znanstvena misel journal The journal is registered and published in Slovenia. ISSN 3124-1123, vol. 1, № 35 – 75 pgs."

Здобувачем виконано аналіз коефіцієнту дисбалансу активних опорів післяремонтних асинхронних двигунів

21. Карпалюк І.Т., Гриб О.Г., Швець С.В., Рудевіч Н.В. Контекстний підхід до єдиного цифрового середовища енергетичних систем // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія : Енергетика : надійність та енергоефективність = Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series : Energy : Reliability and Energy Efficiently : зб. наук. пр./ Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т" : Харків : НТУ «ХПІ», 2019. №14 (1339). С. 3-7

Здобувачем виконано аналіз сучасних тенденцій розвитку енергетики

22. Рудевіч Н.В., Гриб О.Г., Піскурьов М.Ф., Карпалюк І.Т. Реалізація математичної моделі асинхронізованого генератора в фазних координатах в середовищі MATLAB // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія : Гідравлічні машини та гідроагрегати = Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series : Hydraulic machines and hydraulic units : зб. наук. пр./ Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т" : Харків : НТУ «ХПІ», 2019. №1. С. 66-71 (Web of Science)

Здобувачем проведений аналіз побудованої математичної моделі на можливість використання для дослідження перехідних процесів

23. Сендерович Г.А., Дяченко О. В., Захаренко Н. С., Рудевіч Н.В., Карпалюк І.Т. Комплексна методика визначення часткової участі споживача в відповідальності за порушення показників якості електроенергії // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія : Гідравлічні машини та гідроагрегати = Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series : Hydraulic machines and hydraulic units : зб. наук. пр./ Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т" : Харків : НТУ «ХПІ», 2019. №2. С.90-96

Здобувачем проведений аналіз алгоритму роботи приладу для обліку і контролю якості електричної енергії

24. Карпалюк І.Т., Гриб О.Г., Швець С.В., Рудевіч Н.В., Захаренко Н.С. Виявлення коронного розряду на струмопровідних частинах електричної системи за акустичними коливаннями // Науково-технічний збірник гірничої електро-механіка та автоматика Національного ТУ «Дніпровська політехніка» : Дніпро : Національний ТУ «Дніпровська політехніка», 2019. №102. С. 3-7

Здобувачем проведені вимірювання акустичних коливань при наявності коронного розряду на струмопровідних частинах електроустановки

25. Гриб О. Г., Сендерович Г. А., Дяченко О. В., Карпалюк І. Т., Швець С. В. Аналіз методів визначення часткової участі суб'єктів у відповідальності за порушення якості електроенергії по синусоїдальності кривої напруги // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія : Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика : зб. наук. пр./

Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т" : Харків : НТУ «ХПІ», 2020. №4. С. 57-62

Здобувачем проведений аналіз джерел по методам, що використовують визначення часткової участі за параметрами режиму електричної мережі

26. M. Rezinkina, O. Rezinkin, I. Karpaliuk, V. Grabko "Control and Monitoring of Power Transmission Lines Condition over Wide Area with the Help of UAVs," 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 2020, DOI : 10.1109/ESS50319.2020.9160150. (Scopus)

Здобувачем проведені поверхові огляди високовольтних ліній електрорпередач за допомогою квадрокоптера, підготовані відповідні фотометріали і дані для аналізу виконання замірів акустичних коливань при наявності коронного розряда

27. Пристрій занулення електроустановок в мережах із заземленою нейтраллю : пат. 15299 Україна : МПК H02H 3/20. / Абракітов В.Е., Карпалюк І.Т., заявл. 17.08.1994, опубл. 30.06.1997. Бюл. №3

Здобувачем запропоновано основну ідею по використанню пристрою занулення

28. Заземлюючий пристрій в електричних мережах з ізолюваною нейтраллю : Пат. 24461 Україна : МПК H02H 3/20. / Абракітов В.Е., Карпалюк І.Т., заявл. 05.08.1994, опубл. 30.10.1998. Бюл. №5

Здобувачем запропоновано основну ідею по створенню і використанню заземлюючого пристрою

АНОТАЦІЇ

Карпалюк І.Т. Методи та засоби оцінки впливу коронного розряду на якість електропостачання. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2021.

У роботі міститься вирішення актуальної науково-технічної проблеми створення та вдосконалення методів і засобів контролю параметрів якості систем електропостачання, що дозволить підвищити достовірність контролю і діагностики стану систем електропостачання при обмеженнях на обсяг вимірювальної інформації. Ця проблема полягає в урахуванні впливу на якісні показники системи електропостачання такого погіршуючого фактора як коронний розряд.

До цього часу коронний розряд враховувався як паразитний споживач потужності. В даній роботі звернуто увагу на зв'язок коронного розряду і погіршення якісних показників електропостачання: коронний розряд може спричиняти перешкоди для спрацювання релейного захисту; коронний розряд може стати джерелом умов для виникнення дугового розряду на ізоляторах;

коронний розряд є індикатором проблеми ізоляційних частин електроенергетичної системи.

В роботі запропоновано визначити наявність коронного розряду і його координати для можливості проведення заходів по його усуненню. Наявність коронного розряду і його координати запропоновано визначити по його акустичному випроміненню. Запропонований метод було перевірено в лабораторних умовах. За результатами лабораторних досліджень було з'ясовано акустичні спектри притаманні саме коронному розряду.

Було розроблено математичну модель, що дозволяє визначити наявність акустичного спектру коронного розряду в шумах електричного обладнання.

Запропонована технологія акустичного визначення коронного розряду та метод визначення коронного розряду за акустичним спектром дозволяють створювати прилади діагностики.

Запропонований метод акустичної діагностики дозволяє використовувати розроблену апаратну акустично діагностуючу систему, яка дозволяє проводити експрес-діагностику при встановленні навіть на платформах, що пересуваються і мають значну швидкість руху. Результати експериментальних досліджень розробленої системи показали її відповідність технічним вимогам та можливість отримання діагностичної інформації при гальванічно незалежному діагностуванні.

Ключові слова: якість електропостачання, коронний розряд, акустичні коливання, акустичний спектр, крива потужності звуку, виявлення наявності коронного розряду, 3D модель потужності акустичного поля, визначення координат коронного розряду, безпілотний літальний апарат.

Карпалюк І.Т. Методы и средства оценки воздействия коронного разряда на качество электроснабжения. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы. - Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2021.

В работе содержится решение актуальной научно-технической проблемы создания и совершенствования методов и средств контроля параметров качества систем электроснабжения, что позволит повысить достоверность контроля и диагностики состояния систем электроснабжения при ограничениях на объем измерительной информации. Эта проблема заключается в учете влияния на качественные показатели системы электроснабжения такого ухудшающего фактора как коронный разряд.

До этого времени коронный разряд учитывался как паразитный потребитель мощности. В данной работе обращено внимание на связь коронного разряда и ухудшение качественных показателей электроснабжения: коронный разряд может создавать помехи для срабатывания релейной защиты;

коронный разряд может стать источником условий для возникновения дугового разряда на изоляторах; коронный разряд является индикатором проблемы изоляционных частей электроэнергетической системы.

В работе предложено определять наличие коронного разряда и его координаты для возможности проведения мероприятий по его устранению. Наличие коронного разряда и его координаты предложено определять по акустическому излучению. Предложенный метод был проверен в лабораторных условиях. По результатам лабораторных исследований были выяснены акустические спектры присущие именно коронному разряду.

Была разработана математическая модель, позволяющая определить наличие акустического спектра коронного разряда в шумах электрического оборудования.

Предложенный метод определения наличия коронного разряда по акустическому спектру и метод определения координат коронного разряда по акустическому излучению позволяют создавать приборы диагностики.

Предложенный метод акустической диагностики позволяет использовать разработанную акустическую диагностическую систему, которая позволяет проводить экспресс-диагностику при установке даже на платформах, которые перемещаются и имеют значительную скорость движения. Результаты экспериментальных исследований разработанной системы показали ее соответствие техническим требованиям и возможность получения диагностической информации при гальванически независимом диагностировании.

Ключевые слова: качество электроснабжения, коронный разряд, акустические колебания, акустический спектр, кривая мощности звука, выявление наличия коронного разряда, 3D модель мощности акустического поля, определения координат коронного разряда, беспилотный летательный аппарат.

Karpaliuk IT Methods and tools for assessing the impact of corona discharge on the quality of power supply. - Qualifying scientific work as a manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of technical sciences on a specialty 05.09.03 - electrotechnical complexes and systems. - National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2021.

The dissertation is devoted to the decision of an actual scientific and technical problem of creation and improvement of methods and means of control of parameters of quality of power supply systems that will allow to increase reliability of control and diagnostics of a condition of power supply systems at restrictions on volume of measuring information. This problem is to take into account the impact on the quality of the power supply system of such a deteriorating factor as corona discharge.

Qualitative parameters of power supply and quality of electric energy as an element of power supply, became a subject of researches of known scientists, among which, it is necessary to allocate Shidlovsky AK, Zharkin AF, Sokol EI, Zhezhelenko AD, Mushroom O. G., Zhelezko YS, Stogniy BS, Novsky VO, and others.

From the point of view of qualitative indicators of power supply the corona discharge is an influential phenomenon as it exists at normal operating modes of system and influences operation of relay protection, can become a source of conditions for emergence of an arc discharge and is one of factors of change of uninterruptedness. impact on network equipment.

Thus, according to the Electric Power Research Institute (EPRI) in the United States, the number of failures of polymer insulators on 115 and 138 kV transmission lines has increased. EPRI studies have shown that these failures are due to the constant impact on the insulation of corona discharges [39].

The study of the corona category was engaged in such scientists as: Alexandrov OP, Scanavi GI, Kaptsov NA, Popkov VI, Levitov VI, and others.

Based on the characteristics of the corona discharge, it was mostly considered as a parasitic power consumer [66 – 88]. In this paper, attention is paid to the relationship between corona discharge and the deterioration of quality indicators of power supply. The paper proposes to determine the presence of the corona discharge and its coordinates for the possibility of measures to eliminate it.

Remote means to determine the presence of corona discharge are relevant and such technologies are evolving.

Already known and used in practice methods for determining the presence of corona discharge by ultraviolet radiation [94, 95], by infrared radiation [96, 97], by the existing electromagnetic background [43 – 47, 49, 60, 61, 62, 99], by the presence of chemical compounds [98, 100 – 106]. Remote control methods of insulators have shortcomings that did not allow to displace the visual inspection of electrical equipment, but only supplemented it. At the same time superficial inspections do not always allow to reveal defects as in most cases corona discharges are not visible.

Thus, there is an urgent scientific problem associated with the lack of effectiveness of existing methods of determining the presence of corona discharge. The analysis revealed the need to develop and study new methods for determining the presence of a corona discharge and its coordinates. Such methods should be remote, galvanically discharged with minimal exposure to external factors, such as weather conditions, hours of day and others. In this paper, the presence of a corona discharge and its coordinates are proposed to be determined by its acoustic radiation. The solution of the specified problem on the basis of methods of the spectral analysis of the acoustic noises accompanying a corona discharge is offered.

The following main scientific results were obtained:

- for the first time a method of searching for corona discharge coordinates by acoustic radiation was proposed, which allowed to develop principles for means of automatic determination of corona discharge coordinates;
- for the first time a method of determining the presence of a corona discharge by the spectrum of acoustic radiation by a corona discharge is proposed, which allows to determine the presence of a corona discharge by non-contact method;
- further developed the theory of the origin of harmonic components in electric current, which, in contrast to the known, allowed to determine the corona discharge -

as one of the sources of harmonic components in the normal state of the power system;

- the corona discharge model was further developed, namely the dependences of the corona discharge spectrum of the acoustic radiation were revealed, which allows to obtain mathematically substantiated acoustic-energy dependences.

Approaches and recommendations for construction of models and plans of measured complexes and carrying out on their basis of hardware monitoring and diagnostics of a condition of power supply system, in the form of a software package, and also in the form of the developed technical devices or their components that allow to create acoustic devices are of practical value. diagnostics of power supply system.

The practical problem of automating the procedure of determining the presence and coordinates of the corona discharge at any time of day in any weather conditions, which allows to identify the corona discharge and significantly reduces the cost of finding one of the factors changing the quality of electricity.

Based on the proposed approaches and methods, information technology for obtaining new diagnostic information using standard diagnostic methods and tools has been developed.

The information-measuring technology for determining the presence and location of the corona discharge on high and ultra-high voltage electrical equipment has been developed, despite the modes of operation of the power supply system.

A hardware information system has been developed, which allows to carry out rapid diagnostics of the presence of a corona discharge under different weather conditions and at different hours of the day. The results of experimental studies of the developed system showed its compliance with technical requirements and the possibility of obtaining diagnostic information for galvanically independent diagnosis. The design elements and the principle of operation of the developed system for rapid diagnostics are protected by Ukrainian patents for utility models (US Pat. No. 15299, US Pat. No. 24461).

The results of the work are implemented in PJSC "Ukrhydroproekt" (Kharkov), in the survey of elements of the power supply system, in LLC "Kharkov specialized installation and maintenance company", in the analysis of the presence of corona discharge in the power supply system, in the educational process of automation and cybersecurity Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" in teaching the course "Technology, problems and prospects for the development of the industry."

Key words: power supply quality, corona discharge, acoustic vibrations, acoustic spectrum, sound power curve, corona discharge detection, 3D model of the acoustic field power, determination of corona discharge coordinates, unmanned aerial vehicle.



Підписано до друку 02.03.2021 р.
Формат 60x84/16. Папір офсетний. Друк цифровий.
Гарнітура Times. Ум. друк. арк. 0,9.
Наклад 100 прим. Зам. № 1625

Віддруковано в ТОВ «ДРУКАРНЯ МАДРИД»
61024, м. Харків, вул. Гуданова, 18
Тел.: (057) 756-53-25
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
Серія ДК, № 4399 от 27.08.2012 р.
www.madrid.in.ua e-mail: info@madrid.in.ua